

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

COMPARAISON DE MODÈLES HYDRODYNAMIQUES BIDIMENSIONNELS :  
SRH-2D, HYDRO\_AS-2D ET HSL-2D

BASILE LAVOIE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CIVIL)

DÉCEMBRE 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

COMPARAISON DE MODÈLES HYDRODYNAMIQUES BIDIMENSIONNELS :  
SRH-2D, HYDRO\_AS-2D ET HSL-2D

présenté par : LAVOIE Basile

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FUAMBA Musandji, Ph. D., président

M. MAHDI Tew-Fik, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. SHAKIBAEINIA Ahmad, Ph. D., membre

## **REMERCIEMENTS**

Mes remerciements vont à mon directeur de recherche, Monsieur Tew-Fik Mahdi, pour m'avoir initié à cette discipline passionnante ainsi que pour les nombreux conseils prodigués et la souplesse avec laquelle il m'a laissé aborder le sujet.

## RÉSUMÉ

La méthode des volumes finis est aujourd'hui largement acceptée et est implantée dans nombre de modèles d'hydrodynamique à surface libre. Ces modèles ayant généralement des discrétisations et des implantations qui sont inconnues de l'utilisateur, le qualificatif de « boîtes noires » leur est souvent attribué pour souligner la difficulté de valider les résultats. Ce mémoire présente donc une comparaison de trois modèles hydrodynamiques bidimensionnels utilisant la méthode des volumes finis : SRH-2D, HYDRO\_AS-2D et HSL-2D. Les deux premiers sont des modèles commerciaux bien établis tandis que HSL-2D est un modèle maison codé dans le cadre de ce mémoire. Cette comparaison est menée en deux principales étapes, soit l'acquisition des données et la comparaison.

Un jeu de données est d'abord créé au *Laboratoire d'hydrodynamique* de l'*École Polytechnique de Montréal*. Celui-ci concerne trois configurations de canaux pour chacune desquelles trois débits sont étudiés, neuf cas d'écoulements sont donc acquis et diffusés. Cette étape donne lieu à la validation d'une méthode originale pour déterminer le coefficient de rugosité de Manning sur modèle réduit, la calibration automatique. Cette méthode se montre efficace et précise si elle est utilisée en tenant compte des intervalles théoriques du coefficient. La comparaison des deux modèles est ensuite menée sur les écoulements permanents des trois configurations de canaux puis sur un cas-test d'écoulement non permanent de type rupture de barrage (Soares-Frazão 2007). HYDRO\_AS-2D est généralement plus précis à l'exception de quelques cas ayant des maillages très fins. Ce dernier modèle réagit mal à certains cas-tests ayant de petites dimensions et son module 1-step (simplifié) doit être utilisé. Si HYDRO\_AS-2D est plus rapide pour un même pas de temps, SRH-2D permet à l'utilisateur de choisir lui-même ce paramètre ce qui peut le rendre plus rapide dans certains cas. HYDRO\_AS-2D réagit mieux à la calibration automatique du coefficient de rugosité de Manning. HSL-2D, basé sur la discrétisation de Cea et Bladé (2015), fournit une précision comparable aux modèles commerciaux pour des cas d'écoulements en laboratoires et en rivière, mais a un temps de calcul très élevé qui le rend difficilement utilisable à grande échelle.

## ABSTRACT

Even though the finite volumes method is now widely accepted and implemented in river hydraulic software, the types of discretization and implementation may differ from one software to another and are usually unknown from the user. This leads engineers to consider these tools as “black boxes” since they have to rely on the developers’ reputation regarding the accuracy of the model. This work presents a comparison of SRH-2D, HYDRO\_AS-2D and HSL-2D; all are two-dimensional hydrodynamic models using the finite volumes method. SRH-2D and HYDRO\_AS-2D are well-known commercial models while HSL-2D was coded for the purpose of this research. The task is conducted in two specific phases which are the data acquisition and the models comparison.

A dataset is created at the *Laboratoire d’hydrodynamique* in *École Polytechnique de Montréal*. Three channel configurations are studied with three increasing permanent discharges, creating nine available test-cases. For these cases, the Manning’s roughness coefficients are determined using automatic calibration which proves to be reliable when used with theoretical intervals. A comparison is then made on the three configurations with permanent discharges and on a dam-break test-case (Soares-Frazão 2007). HYDRO\_AS-2D is more accurate in predicting the water depth except for some cases with very dense meshes. This model sometimes reacts badly to small dimensions and its 1-step simplified module has to be used instead of the normal 2-step module. HYDRO\_AS-2D is faster than SRH-2D when an identical time step is used but the latter offers the user the choice of this parameter which may advantage SRH-2D in some cases. Automatic calibration is more efficient and accurate with HYDRO\_AS-2D. HSL-2D gives similar accuracy as SRH-2D and HYDRO\_AS-2D but is much slower.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT .....	V
TABLE DES MATIÈRES .....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XV
LISTE DES ANNEXES.....	XVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Objectifs principaux .....	2
1.2 Objectifs spécifiques .....	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	4
2.1 Description des modèles utilisés .....	4
2.1.1 Volumes finis .....	4
2.1.2 SRH-2D version 3 .....	6
2.1.3 HYDRO_AS-2D version 4.....	7
2.1.4 Comparaison précédente de SRH-W et HYDRO_AS-2D .....	8
2.1.5 Decoupled Hydrological Discretization (DHD).....	9
2.1.6 SMS version 12.1 .....	12
2.1.7 Calibration automatique .....	12
2.2 Modélisation physique .....	14
CHAPITRE 3 DÉMARCHE DU TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT.....	16

3.1	Chapitre 4 - Article 1 - Manning's Roughness Coefficient Determination in Laboratory Experiments Using 2D Modeling and Automatic Calibration .....	16
3.2	Chapitre 5 – Comparaison en écoulement permanent de SRH-2D et HYDRO_AS-2D	17
3.3	Chapitre 6 - Article 2 - Comparison of two-dimensional Flood Propagation Models : SRH-2D and HYDRO_AS-2D .....	17
3.4	Chapitre 7 – Comparaison de HSL-2D et des modèles commerciaux .....	18
3.5	Note .....	18
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 – MANNING'S ROUGHNESS COEFFICIENT DETERMINATION IN LABORATORY EXPERIMENTS USING 2D MODELING AND AUTOMATIC CALIBRATION.....		19
4.1	Introduction .....	20
4.2	Background .....	21
4.3	Experimental Setup .....	22
4.3.1	Instrumentation.....	22
4.3.2	Channel Configurations.....	22
4.3.3	Experiments.....	26
4.4	Statistical Treatment.....	27
4.5	Determination of Manning's Roughness Coefficients .....	29
4.5.1	Manning's Coefficient Values – Theoretical Intervals .....	29
4.5.2	Step Method – 1D Flow – Flatbed Channel .....	30
4.5.3	Automatic Calibration – 2D Flow – All Configurations.....	31
4.5.4	Comparison of Calibration Methods .....	35
4.6	Presentation of Data Sets.....	36
4.7	Conclusion.....	37
4.8	Acknowledgment .....	37

4.9	Notations .....	37
4.10	Supplemental Data .....	38
4.11	References .....	39
CHAPITRE 5 COMPARAISON EN RÉGIME PERMANENT DE SRH-2D ET HYDRO_AS-2D .....		41
5.1	Configuration 2 – Canal avec seuil triangulaire.....	43
5.1.1	Profondeur d’eau .....	43
5.1.2	Vitesse .....	46
5.1.3	Temps de calcul.....	47
5.2	Configuration 3 – Canal avec butée triangulaire.....	49
5.2.1	Profondeur d’eau .....	49
5.2.2	Temps de calcul.....	51
5.3	Discussion .....	52
CHAPITRE 6 ARTICLE 2 - COMPARISON OF TWO-DIMENSIONAL FLOOD PROPAGATION MODELS: SRH-2D AND HYDRO_AS-2D.....		54
6.1	Introduction .....	55
6.2	Presentation of Models.....	57
6.2.1	SRH-2D Version 3 .....	57
6.2.2	HYDRO_AS-2D Version 4.....	58
6.3	SMS Version 12.1 .....	59
6.4	PEST Version 13.....	59
6.5	Methodology .....	60
6.5.1	Test-case.....	60
6.5.2	Time Step and Mesh Sensitivity and Water Depth Accuracy .....	61
6.5.3	Response to Automatic Calibration.....	63



6.6	Results and Discussion.....	63
6.6.1	Time Step and Mesh Sensitivity—SRH-2D.....	63
6.6.2	Mesh Sensitivity—HYDRO_AS-2D .....	65
6.6.3	Water Depth Profiles and Oscillations .....	65
6.6.4	Water Depth RMSE .....	67
6.6.5	Computation time.....	68
6.6.6	Response to Calibration .....	70
6.7	Conclusion.....	72
6.8	Acknowledgments .....	72
6.9	References .....	72
CHAPITRE 7 COMPARAISON DE HSL-2D ET DES MODÈLES COMMERCIAUX.....		75
7.1	Présentation du modèle .....	75
7.1.1	Maillage.....	75
7.1.2	Pas de temps .....	75
7.1.3	Conditions aux frontières .....	75
7.1.4	Paramètres de simulation .....	76
7.1.5	Fonctionnement.....	76
7.1.6	Résultats .....	78
7.2	Comparaison.....	79
7.2.1	Configuration 2 – Canal avec seuil triangulaire.....	79
7.2.2	Configuration 3 – Canal avec butée triangulaire.....	80
7.2.3	Rupture de barrage sur canal avec seuil triangulaire.....	82
7.2.4	Rivière Cimarron.....	85
7.3	Discussion .....	89

CHAPITRE 8	DISCUSSION GÉNÉRALE .....	90
8.1	Acquisition de données expérimentales .....	90
8.1.1	Limitations .....	90
8.2	Comparaison des modèles commerciaux .....	90
8.2.1	Limitations .....	91
8.3	Comparaison de HSL-2D aux modèles commerciaux .....	91
8.3.1	Limitations .....	91
CHAPITRE 9	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	93
9.1	Contributions .....	94
BIBLIOGRAPHIE	.....	96
ANNEXES	.....	100

## LISTE DES TABLEAUX

Table 4.1. Uncertainties in measured values .....	28
Table 4.2. Theoretical intervals of Manning's roughness coefficient.....	30
Table 4.3. Manning's coefficients determined with automatic calibration for theoretical intervals .....	34
Table 4.4. Manning's coefficients determined with automatic calibration ignoring theoretical intervals .....	35
Table 4.5. Boundary conditions .....	36
Table 4.6. Final Manning's roughness coefficients .....	36
Tableau 5.1. Paramètres de régression concernant les temps de calcul des trois maillages .....	49
Table 6.1. Time steps .....	62
Table 6.2. Meshes.....	62
Table 6.3. Time steps used for computation time comparison.....	69
Table 6.4. Calibration parameters and results .....	70
Table 7.1. Vecteurs et matrices contenant les variables géométriques .....	77
Table 7.2. Différences moyennes de profondeurs d'eau entre les modèles .....	89

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Fonctionnement de PEST (tiré de Lavoie et Mahdi (2016)– article en soumission)...	14
Figure 4.1. Initial flatbed channel .....	23
Figure 4.2. Cracks geometry .....	23
Figure 4.3. First configuration - Positions of geometric and water depth surveys .....	24
Figure 4.4. Flow over a triangular sill (left) – Second configuration, sectional view (right) .....	24
Figure 4.5. Second configuration - Positions of geometric and water depth surveys .....	25
Figure 4.6. Third configuration – Flow around a triangular abutment (left) – Plan view (right) ..	25
Figure 4.7. Third configuration - Positions of geometric and water depth surveys .....	26
Figure 4.8. Sensor on the sliding system.....	27
Figure 4.9. Comparison of the theoretical and step methods for calculating Manning’s coefficients in the initial flatbed channel .....	31
Figure 4.10. Meshes of: Initial flatbed channel (a) channel with the triangular sill (b), channel with the triangular abutment (c) .....	33
Figure 4.11. Comparison of water depth RMSEs calculated using SRH-2D for the three calibration methods .....	36
Figure 5.1. De haut en bas - Maillages : grossier, moyen puis fin pour canal avec seuil (configuration 2) et grossier, moyen puis fin pour canal avec butée (configuration 3). .....	42
Figure 5.2. Analyse de sensibilité au pas de temps et à la densité du maillage pour SRH-2D – Configuration 2 .....	43
Figure 5.3. Analyse de sensibilité à la densité du maillage pour HYDRO_AS-2D – Configuration 2.....	44
Figure 5.4. RMSE sur la profondeur d’eau – Configuration 2.....	45
Figure 5.5. RMSE sur la profondeur d’eau avec un nombre de jauges restreint – Configuration 2 .....	45

Figure 5.6. Différences des vitesses classées (Valeurs négatives si les vitesses de SRH-2D sont plus élevées) .....	46
Figure 5.7 Vitesses autour du seuil triangulaire telles que calculées par SRH-2D (haut) et HYDRO_AS-2D (bas) .....	47
Figure 5.8. Temps de calcul en fonction du pas de temps de SRH-2D – Configuration 2 .....	48
Figure 5.9. Comparaison des temps de calcul de SRH-2D et HYDRO_AS-2D – Configuration 2 <sup>1</sup> .....	48
Figure 5.10. Analyse de sensibilité au pas de temps et au maillage pour SRH-2D – Configuration 3 .....	49
Figure 5.11. Analyse de sensibilité au maillage pour HYDRO_AS-2D – Configuration 3 .....	50
Figure 5.12. RMSE sur la profondeur d'eau – Configuration 3 .....	50
Figure 5.13. RMSE sur la profondeur d'eau avec nombre de jauges restreint – Configuration 3 .....	51
Figure 5.14. Temps de calcul de SRH-2D – Configuration 3 .....	52
Figure 5.15. Comparaison des temps de calcul de SRH-2D et HYDRO_AS-2D – Configuration 3 <sup>2</sup> .....	52
Figure 6.1. Channel geometry, initial conditions and gauges positions .....	61
Figure 6.2. Meshes in a 0.5 m × 0.45 m zone .....	62
Figure 6.3. Water depth RMSE relative to time step refinement at Gauges 1, 2 and 3- SRH-2D .....	64
Figure 6.4. Water depth RMSE relative to mesh refinement – SRH-2D .....	64
Figure 6.5. Water depth RMSE relative to mesh refinement – HYDRO_AS-2D .....	65
Figure 6.6. Water depth at gauge 1 for meshes 1, 2, 3 and 4– HYDRO_AS-2D .....	66
Figure 6.7. Water depth at gauge 1 for meshes 1, 2,3 and 4– SRH-2D .....	67
Figure 6.8. Comparison of computed water depth RMSEs – Meshes 1, 2, 3 and 4 .....	68
Figure 6.9. Computation time relative to time step refinement – SRH-2D .....	69
Figure 6.10. Comparison of computation time .....	70

Figure 6.11. Comparison of water depth with suggested and calibrated Manning's coefficient at gauge 1 – SRH-2D .....	71
Figure 7.1. Fonctionnement et structure de la résolution – HSL-2D .....	78
Figure 7.2. Exemple de fichier sortant .....	78
Figure 7.3. Analyse de sensibilité à la densité du maillage pour HSL-2D – Configuration 2 .....	80
Figure 7.4. Comparaison de la RMSE sur la profondeur d'eau des trois modèles – Configuration 2 .....	80
Figure 7.5. Analyse de sensibilité à la densité du maillage pour HSL-2D – Configuration 3 .....	81
Figure 7.6. Comparaison de la RMSE sur la profondeur d'eau des trois modèles – Configuration 3 .....	81
Figure 7.7. RMSE de la profondeur d'eau selon la densité du maillage- HSL-2D .....	82
Figure 7.8. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 avec le maillage 1 – HSL-2D .....	83
Figure 7.9. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 avec le maillage 2 – HSL-2D .....	83
Figure 7.10. Comparaison des RMSE sur la profondeur d'eau des trois modèles - Maillage 1 ....	84
Figure 7.11. Comparaison des RMSE sur la profondeur d'eau des trois modèles – Maillage 2 ...	84
Figure 7.12. Temps de calcul .....	85
Figure 7.13. Localisation du site : États-Unis (en haut à gauche), Oklahoma (en haut à droite) et rivière Cimarron (en bas). Source : Google Earth.....	86
Figure 7.14. Maillage utilisé et profondeurs d'eau dans la rivière Cimarron telles que modélisées par SRH-2D (en haut à droite), HYDRO_AS-2D (en bas à gauche) et le HSL-2D (en bas à droite) .....	87
Figure 7.15. Différences de profondeurs d'eau en valeurs absolues classées entre: HSL-2D et SRH-2D (en haut à gauche), HSL-2D et HYDRO_AS-2D (en haut à droite) et SRH-2D et HYDRO_AS-2D (bas). .....	88
Figure D.1. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 – Maillage 1 .....	110
Figure D.2. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 – Maillage 2 .....	111

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CFL	Condition de Courant Friedrichs Lewy
D	Diamètre hydraulique
DHD	Decoupled Hydrological Discretization
A	Aire mouillée d'une section d'écoulement
B	Largeur de la section à la surface
$D_h$	Profondeur hydraulique
e	Terme source
f	Pertes d'eau par infiltration (modèle DHD)
g	Accélération gravitationnelle
h	Profondeur d'eau
$J_e$	Pente d'énergie
$J_f$	Pente du lit
k	Énergie cinétique de turbulence
$l_{exp}$	Valeur expérimentale tirée d'un ensemble de mesure
$l_i$	Valeur expérimentale tirée d'une mesure
L	Longueur d'un côté d'une cellule
m	Valeur mesurée moyenne
N	Nombre de mesures
n	Coefficient de rugosité de Manning
$\vec{n}$	Vecteur unitaire
$n_c$	Coefficient de rugosité de Manning équivalent d'une section composée
$n_i$	Coefficient de rugosité de Manning d'une sous-section
$O(\Delta x)^n$	Ensemble des termes d'ordre supérieur à n dans un développement en série de Taylor

P	Périmètre mouillé
PEST	Parameter Estimation
q	Débit unitaire
R	Intensité de la pluie (modèle DHD)
$R_h$	Rayon hydraulique
SIG	Systèmes d'information géographique
SMS	Surface-water Modeling System
SRH-2D	Sedimentation and River Hydraulics 2D
$S_{bx}$ , $S_{by}$	Pente du lit (utilisé dans l'article 1 seulement)
$S_{fx}$ , $S_{fy}$	Pente d'énergie (utilisé dans l'article 1 seulement)
$s_m$	Écart-type d'un ensemble de mesures
T	Contrainte due à la turbulence
t	Temps
$t_{VP}$	Coefficient de Student associé à un degré de liberté et à un degré de confiance
u	Vitesse (x)
v	Vitesse (y)
z	Niveau d'eau
$z_b$	Niveau du lit
$\Delta E$	Variation d'énergie
$\Delta l$	Incertitude sur une valeur expérimentale
$\Delta t$	Pas de temps
$\Delta x$	Variation spatiale (distance) dans la direction x
$\mu$	Viscosité totale (turbulente et cinématique)
$\mu_0$	Viscosité cinématique de l'eau



$\mu_t$	Viscosité turbulente
$\rho$	Masse volumique de l'eau
$\tau$	Contrainte de cisaillement

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Fichier complémentaire à l’article 1 – Configuration 1 .....	100
Annexe B – Fichier complémentaire à l’article 1 – Configuration 2 .....	103
Annexe C – Fichier complémentaire à l’article 1 – Configuration 3 .....	107
Annexe D – Graphiques complémentaires – Cas-test de rupture de barrage .....	110

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'implantation efficace des différents ouvrages et aménagements hydrauliques ainsi que le maintien de leurs fonctions sociales, environnementales et économiques sont intimement liés à la compréhension et à la prévision du comportement des écoulements à surface libre. De fait, l'alimentation en eau, la protection contre les inondations, l'irrigation, le drainage, la navigation et la production d'électricité présupposent une maîtrise des moyens techniques et l'assurance de leur fiabilité.

Si, historiquement, cette expertise a d'abord été construite sur la base d'essais-erreurs et sur l'expérience des concepteurs (Ettema 2000), la physique s'est rapidement emparée de la discipline avec des contributions importantes de la part de scientifiques tels que Manning (1891), Strickler (1923), Darcy et Bazin (1865), Chézy (Herschel 1897), Bernoulli (1738), Saint-Venant (1871) et Boussinesq (1872). De ces avancées sont nées les méthodes de modélisation qui se sont perfectionnées avec l'utilisation de modèles réduits puis numériques.

Les méthodes numériques ont elles-mêmes rapidement évolué depuis la méthode des caractéristiques jusqu'à la méthode des volumes finis, en passant par les différences finies et les éléments finis. Les volumes finis semblent s'imposer au cours des dernières années comme la famille de méthodes la plus précise notamment en raison de la conservation de la masse qui y est assurée (Versteeg et Malalasekera 1995). Cette méthode est désormais implantée dans de nombreux modèles commerciaux comme BASEMENT (Vetsch 2015), HEC-RAS (Brunner 2016), HYDRO\_AS-2D (Nujic 2003), SRH-2D (Lai 2008), TU-FLOW FV (BMTWBM 2014) et Riverflow 2D (Hydronia 2015).

Bien que la méthode des volumes finis soit maintenant largement répandue, les modèles l'utilisant présentent des discrétisations qui diffèrent et des implantations généralement inconnues de l'utilisateur, d'où le qualificatif de « boîtes noires » qui leur est souvent attribué. De plus, ceux-ci sont validés par leurs concepteurs et rarement comparés entre eux, se pose donc la question de leur fiabilité et de leur précision. C'est à cela que s'attache le présent mémoire en comparant deux modèles commerciaux, SRH-2D et HYDRO\_AS-2D, ainsi qu'un modèle académique simplifié, HSL-2D. SRH-2D, développé par Lai (2008), est très présent aux États-Unis tandis que HYDRO\_AS-2D (Nujic 2003) est commercialisé par la firme Hydrotec et est surtout utilisé dans les pays germanophones d'Europe. HSL-2D (*Hydraulique à Surface Libre*

2D) est développé dans le cadre du présent mémoire et se base sur la discrétisation DHD présentée par Cea et Bladé (2015).

La comparaison se base sur trois cas-tests; deux écoulements en régime permanent dont l'acquisition des données fait également partie de ce travail et un écoulement en régime non permanent qui est fourni et présenté par Soares-Frazão (2007).

Les objectifs principaux et spécifiques de ce travail s'expriment comme suit :

## **1.1 Objectifs principaux**

1. Acquisition d'un jeu de données expérimentales fiables et de qualité.
2. Comparaison des performances de deux modèles hydrodynamiques bidimensionnels commerciaux, SRH-2D et HYDRO\_AS-2D, et d'un modèle académique simplifié, HSL-2D.

## **1.2 Objectifs spécifiques**

Les deux premiers objectifs spécifiques se réfèrent au premier objectif principal et les quatre suivants au deuxième objectif principal.

1. Acquisition des valeurs expérimentales des profondeurs d'eau de trois écoulements permanents en laboratoire et traitement statistique des données.
2. Validation de la calibration automatique comme nouveau moyen de détermination du coefficient de friction de Manning pour des écoulements en laboratoire.
3. Programmation en langage MATLAB d'un modèle académique simplifié bidimensionnel par volumes finis pour la résolution des équations de Saint-Venant (HSL-2D).
4. Comparaison du temps de calcul des trois modèles en régimes permanent (SRH-2D et HYDRO\_AS-2D) et non permanent (SRH-2D, HYDRO\_AS-2D et HSL-2D).
5. Comparaison de la précision du calcul de la profondeur d'eau des trois modèles en régimes permanent et non permanent.
6. Comparaison de la réaction des deux modèles commerciaux à la calibration automatique en régime non permanent.

Ce mémoire s'articule donc autour de ces objectifs principaux et spécifiques et débute avec une revue de littérature et une explication de la démarche générale et de l'intégration des différents chapitres. Suivent deux articles et deux chapitres complémentaires présentant l'acquisition des données, la comparaison des modèles commerciaux en régimes permanent et non permanent puis la présentation du modèle maison et sa comparaison avec SRH-2D et HYDRO\_AS-2D. La discussion générale intègre ensuite les résultats de tous les chapitres et la conclusion permet de clore ce mémoire en formulant un certain nombre d'observations et de recommandations.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section présente un rappel sur la méthode des volumes finis puis passe en revue les travaux antérieurs concernant les modèles utilisés, les comparaisons disponibles et la diffusion de données expérimentales. Il est à noter que, en raison du format « par article » de ce mémoire, les revues de littérature présentées dans les articles des chapitres 4 et 6 sont essentiellement des versions condensées de certains sujets abordés dans le présent chapitre. Afin d'éviter cette redondance, le lecteur intéressé par une revue plus concise est invité à se rapporter directement aux articles.

### 2.1 Description des modèles utilisés

#### 2.1.1 Volumes finis

Est présentée ici la méthode générale des volumes finis telle que décrite par Bermudez et al. (1998). Cette famille de méthode est implantée dans les trois modèles considérés pour ce mémoire. On considère le système d'équations général suivant :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \mathbf{F} = \mathbf{G} \quad 2.1$$

Le système est d'abord intégré sur l'aire  $A$  d'une cellule quelconque  $C$  d'un maillage.

$$\iint_A \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dA + \iint_A \nabla \mathbf{F} dA = \iint_A \mathbf{G} dA \quad 2.2$$

Le théorème de Green ou théorème de divergence peut ensuite être appliqué de manière à transformer l'intégrale double du deuxième terme en intégrale curviligne.

$$\iint_A \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dA + \int_L \mathbf{F} \vec{n} dL = \iint_A \mathbf{G} dA \quad 2.3$$

Où  $L$  correspond à la frontière de la cellule et  $\vec{n}$  au vecteur normal au côté de la cellule.

La dérivée en fonction du temps  $t$  peut être approximée, par exemple, à l'aide de la méthode d'Euler explicite et l'intégrale peut être facilement exprimée puisque l'aire est constante sur la cellule.

$$\frac{\mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^n}{\Delta t} A + \int_L \mathbf{F} \vec{n} dL = \iint_A \mathbf{G} dA \quad 2.4$$

Le deuxième terme qui représente les flux aux interfaces peut être exprimé comme une somme des flux de tous les côtés  $k$  de la cellule :

$$\frac{\mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^n}{\Delta t} A + \sum_{j=1:K} \int_{L_j} \mathbf{F} \vec{n} dL_j = \iint_A \mathbf{G} dA \quad 2.5$$

Le terme de flux peut être approximé par une fonction du flux  $\phi(\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_j, \vec{n})$ :

$$\int_{L_i} \mathbf{F} \vec{n} dL_j = |n| \phi_j \quad 2.6$$

D'où

$$\frac{\mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^n}{\Delta t} A + \sum_{j=1:K} |n| \phi_j = \iint_A \mathbf{G} dA \quad 2.7$$

À partir de cette équation, plusieurs schémas sont proposés pour discrétiser les deuxièmes et troisièmes termes qui représentent respectivement les flux aux interfaces et les termes sources. Toro (2009) suggère plusieurs familles de schémas numériques pour le calcul des flux, on note par exemple les *Random Choice Methods* (RCM), *Flux Vector Splitting Methods* (FVS), *Approximate-State Riemann Solvers*, les solveurs de Riemann de HLL et HLLC, de Roe, de Osher ainsi que les méthodes d'ordres supérieurs *Total Variation Diminishing* (TVD).

La méthode des volumes finis est largement répandue dans les logiciels commerciaux de modélisation des écoulements à surface libre tels que TUFLOW-FV (BMTWBM 2014), RiverFlow2D (Hydronia 2015), SRH-2D (Lai 2008), HYDRO\_AS-2D (Nujic 2003), HEC-RAS (Brunner 2016) et BASEMENT (Vetsch 2015).

### 2.1.2 SRH-2D version 3

SRH-2D résout les équations de Saint-Venant sous la forme suivante (Lai 2008; Lai 2010) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = e \quad 2.8$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial hv u}{\partial y} = \frac{\partial h T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad 2.9$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hu v}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = \frac{\partial h T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad 2.10$$

La friction est déterminée à l'aide de l'équation de Manning :

$$\begin{pmatrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{pmatrix} = \rho C_f \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \sqrt{u^2 + v^2} \quad 2.11$$

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad 2.12$$

Les équations de Boussinesq sont utilisées pour représenter la turbulence :

$$T_{xx} = 2(\mu_0 + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}k \quad 2.13$$

$$T_{xy} = (\mu_0 + \mu_t) \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad 2.14$$

$$T_{yy} = 2(\mu_0 + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \quad 2.15$$

Où  $h$  est la profondeur d'eau,  $u$  et  $v$  les composantes de la vitesse,  $z$  le niveau d'eau,  $e$  un terme source,  $T$  les contraintes dues à la turbulence et aux effets visqueux,  $\tau$  la contrainte de cisaillement du fond,  $g$  l'accélération gravitationnelle,  $\rho$  la masse volumique,  $\mu_0$  la viscosité cinématique de l'eau,  $\mu_t$  la viscosité turbulente,  $k$  l'énergie cinétique turbulente et  $n$  le coefficient de rugosité de Manning.

SRH-2D propose deux modèles de turbulence, le modèle k-epsilon et le modèle parabolique. La limite fixée pour les fronts couvrant découvrant est fixée à 0.001 m en dessous de quoi les



cellules sont considérées comme étant sèches et les équations de Saint-Venant n'y sont pas résolues (Lai 2010).

SRH-2D a été validé par son concepteur sur plusieurs cas expérimentaux, analytiques et de rivières. Lai (2008) et Lai (2010) montrent que le modèle réagit bien lors de la modélisation d'un écoulement dans un canal 1D avec changement de régime à travers un ressaut hydraulique pour lequel une solution analytique a été fournie par MacDonald (1996). SRH-2D a également été testé sur une modélisation de séparation de l'écoulement dans deux canaux perpendiculaires, un cas proposé par Shettar et Murthy (1996). Lai (2008) et Lai (2010) en concluent que l'écoulement à proximité des murs est mieux représenté par le modèle de turbulence k-epsilon que par le modèle parabolique. Un modèle expérimental de canal avec méandre proposé par Zarrati et al. (2005) a montré que la profondeur d'eau modélisée avec SRH-2D est moins sensible au raffinement du maillage que la vitesse (Lai 2008; Lai 2010). Le modèle a finalement donné de bons résultats pour évaluer l'impact de deux cas de retrait de barrages; le barrage du Sandy River Delta et le barrage des Savage Rapids (Lai 2008; Lai 2010).

### 2.1.3 HYDRO\_AS-2D version 4

Les équations de Saint-Venant, telles que résolues par HYDRO\_AS-2D, peuvent s'exprimer sous forme vectorielle (Nujic 2003):

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial y} + \mathbf{G} = 0 \quad 2.16$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} z \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + 0.5gh^2 + \mu h \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - \mu h \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} vh \\ uvh - \mu h \frac{\partial u}{\partial y} \\ v^2h + 0.5gh^2 + \mu h \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{by}) \end{bmatrix}$$

La pente du lit s'exprimant comme suit :

$$S_{bx} = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad S_{by} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad 2.17$$

La pente d'énergie est calculée avec l'équation de Darcy-Weissbach tandis que le coefficient de friction est déterminé avec l'équation de Manning.

$$S_f = \left( 6.34 \frac{2gn^2}{D^{1/3}} \right) \cdot \left( \frac{v|v|}{2gD} \right) \quad 2.18$$

Où  $\mu$  représente la viscosité turbulente,  $S_f$  la pente d'énergie,  $z_b$  le niveau du lit et  $D$  le diamètre hydraulique.

La limite pour les fronts couvrant découvrant est fixée à 0.01 m, mais peut être modifiée par l'utilisateur. Les pas de temps sont calculés automatiquement et tout au long du calcul par HYDRO\_AS-2D. L'utilisateur n'ayant pas d'influence directe sur ce paramètre.

HYDRO\_AS-2D offre à l'utilisateur une version simplifiée de module de calcul (1-step) qui peut être utilisée lorsque l'écoulement est permanent. La discrétisation dans le temps est ainsi de premier ordre contrairement à une discrétisation explicite de Runge-Kutta de second ordre pour le module de calcul principal (2-steps). La version simplifiée réduit le temps de calcul par un facteur d'environ deux (Nujic 2003).

Jones (2011) a comparé HYDRO\_AS-2D à trois autres modèles bidimensionnels : ADH (Berger et al. 2013), FESWMS (Froehlich 2002) et RMA2 (Donnell 2006). Les modèles ont été appliqués à trois cas-tests avec la conclusion que HYDRO\_AS-2D est le plus stable, le plus rapide et le plus facile d'utilisation. En certains cas, HYDRO\_AS-2D a même été le seul modèle capable de livrer un résultat.

## 2.1.4 Comparaison précédente de SRH-W et HYDRO\_AS-2D

Tolossa (2008) et Tolossa et al. (2009) ont comparé les modèles HYDRO\_AS-2D et SRH-W, la première version de SRH-2D. Trois tronçons de rivières sont utilisés dans la comparaison et les deux modèles fournissent de bons résultats pour la profondeur d'eau qui est comparée à des données *in situ*. Les vitesses modélisées par les deux modèles sont comparées entre elles puisque des données terrain ne sont pas disponibles. SRH-W s'avère plus sensible au raffinement du

maillage et est environ cinq fois plus rapide que HYDRO\_AS-2D. Cette comparaison constitue un bon point de départ pour le présent travail. On note cependant que, si la différence de performance en ce qui a trait au temps de calcul est chiffrée, l'écart de précision pour les profondeurs d'eau calculées ne l'est pas. De plus, les coefficients de Manning des modèles sont calibrés sur HYDRO\_AS-2D et ensuite utilisés tels quels sur SRH-W. Cette méthode risque d'avantager artificiellement HYDRO\_AS-2D et nuire à SRH-W puisque les coefficients ainsi déterminés optimisent les performances de HYDRO\_AS-2D mais pas nécessairement celles de SRH-W. La sensibilité de SRH-2D au pas de temps n'est pas non plus évaluée, ce qui peut ne pas refléter exactement les performances du modèle.

### 2.1.5 Decoupled Hydrological Discretization (DHD)

DHD est un schéma par volumes finis proposé par Cea et Bladé (2015) destiné aux modélisations d'écoulements dans les bassins versants ruraux et urbains. Le modèle se démarque principalement par le fait qu'il soit mathématiquement découplé, relativement simple à coder et qu'il demande peu de calcul par pas de temps.

Le modèle DHD résout les équations de Saint-Venant sous la forme suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - f \quad 2.19$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z}{\partial x} - gh \frac{n^2 |q|}{h^{10/3}} q_x \quad 2.20$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{h} \right) = -gh \frac{\partial z}{\partial y} - gh \frac{n^2 |q|}{h^{10/3}} q_y \quad 2.21$$

Où  $q_x$  et  $q_y$  sont les composantes du débit unitaire. Dans cette formulation, les termes représentant la pression hydrostatique et la pente du lit sont unifiés pour donner la pente de la surface libre. Cette formulation ne tient pas compte de la turbulence, ce qui constitue une limite du modèle. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont discrétisées indépendamment et sont donc découplées. Les équations de Saint-Venant sont intégrées sur un volume  $C_i$  à l'aide du théorème de Gauss et dans le temps avec un schéma d'Euler explicite, ce

qui mène à la discrétisation suivante des équations de continuité et de momentum où toutes les variables de l'écoulement sont stockées au centre de la cellule:

$$\frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} A_i + \sum Q_{ij}^n = (R_i^n - f_i^n) A_i \quad 2.22$$

$$\frac{q_{x,i}^{n+1} - q_{x,i}^n}{\Delta t} A_i + \sum F_{x,ij}^n = (T_{x,i}^{n+1} - g h_i^n S_{x,i}^n) A_i \quad 2.23$$

$$\frac{q_{y,i}^{n+1} - q_{y,i}^n}{\Delta t} A_i + \sum F_{y,ij}^n = (T_{y,i}^{n+1} - g h_i^n S_{y,i}^n) A_i \quad 2.24$$

Où  $R$  et  $f$  représentent respectivement l'intensité et les pertes de précipitations qui sont par exemple dues à l'infiltration, l'évaporation, l'évapotranspiration ou l'accumulation d'eau en surface.  $Q$ ,  $F$ ,  $T$  et  $S$  sont les flux de masse, d'inertie, le frottement et la pente de la surface libre.

La vitesse de l'eau à l'interface de deux cellules ( $U_{x,ij}$  et  $U_{y,ij}$ ) est évaluée par une interpolation linéaire en fonction de la distance ( $d_{1,2}$ ) du centre de chaque cellule et est utilisée pour le calcul de la vitesse unitaire normale à l'interface:

$$U_{x,ij} = U_{x,i} \alpha_{ij} + U_{x,j} (1 - \alpha_{ij}) \quad 2.25$$

$$U_{y,ij} = U_{y,i} \alpha_{ij} + U_{y,j} (1 - \alpha_{ij}) \quad 2.26$$

$$\alpha_{ij} = d_2 / (d_1 + d_2) \quad 2.27$$

$$\lambda_{ij} = U_{x,ij} n_{x,ij} + U_{y,ij} n_{y,ij} \quad 2.28$$

La profondeur d'eau ( $h_{ij}^U$ ) et le débit unitaire ( $q_{x,ij}^U$ ) considérés à l'interface sont déterminés selon la vitesse :

$$h_{ij}^U = \begin{cases} h_i & \text{si } \lambda_{ij} \geq 0 \\ h_j & \text{si } \lambda_{ij} < 0 \end{cases}$$

$$q_{x,ij}^U = \begin{cases} q_{x,i} & \text{si } \lambda_{ij} \geq 0 \\ q_{x,j} & \text{si } \lambda_{ij} < 0 \end{cases}$$

Le flux de masse est corrigé à l'aide d'un terme qui dépend de la célérité des vagues et de la différence de profondeur d'eau ou de niveau d'eau de part et d'autre de la face de la cellule. Le flux de momentum ne reçoit aucune correction particulière :

$$Q_{ij} = \lambda_{ij} h_{ij}^U L_{ij} - 0.5 \sqrt{g h_{ij} \Delta_{ij}} L_{ij} \quad 2.29$$

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \max[0, \min(z_j - z_i, h_j - h_i)] & \text{si } z_j - z_i \geq 0 \\ \min[0, \max(z_j - z_i, h_j - h_i)] & \text{si } z_j - z_i < 0 \end{cases}$$

$$F_{x,ij} = \lambda_{ij} q_{x,ij}^U L_{ij} \quad 2.30$$

Le frottement et la pente de la surface libre sont finalement calculés comme suit :

$$T_{x,i} = -g \left( \frac{n^2}{h^{7/3}} |q| \right)_i^n q_{x,i}^{n+1} \quad 2.31$$

$$S_{x,i} = \sum z_{ij} n_{x,ij} \quad 2.32$$

$$z_{ij} = \alpha_{ij} z_i + (1 - \alpha_{ij}) z_j \quad 2.33$$

À noter que les calculs reliés à l'équation du momentum ont été présentés pour la direction  $x$  seulement puisque très similaires dans la direction  $y$ .

La résolution des équations de Saint-Venant étant explicite, les auteurs proposent de calculer le pas de temps en fonction de la condition de courant :

$$\Delta t = \min \Delta t_i \quad 2.34$$

$$\Delta t_i = CFL \frac{\min_{j \in K_i} L_{ij}}{|U|_i + \sqrt{g h_i}}$$

Où la condition de Courant, CFL, doit être inférieure à 1.

Le modèle DHD a été validé par ses concepteurs (Cea et Bladé 2015) sur les cinq cas-tests suivants et a bien réagi :

- Écoulement engendré par une pluie sur une configuration urbaine simplifiée en laboratoire.
- Écoulement dans une jonction reliée à quatre canaux.
- Pluie sur le bassin versant Solivella en Espagne.
- Pluie sur le bassin versant de la rivière Maior en Espagne.
- Rupture de barrage avec obstacle.

### **2.1.6 SMS version 12.1**

*Surface-water Modeling System* – SMS (AQUAVEO 2016) est un logiciel de prétraitement et de post-traitement pouvant être utilisé avec plusieurs modèles d'écoulements à surface libre bidimensionnels. SMS emprunte plusieurs caractéristiques aux *Systèmes d'Information Géographique* (SIG) et les applique notamment au traitement de données topographiques, à la création de maillages et à la visualisation des résultats. Les résultats peuvent être appréciés en trois-dimensions et plusieurs outils sont disponibles pour leur traitement, ce qui rend SMS très versatile. Cette caractéristique est très importante dans le cadre du présent travail puisque SMS permet l'utilisation d'un même maillage sur deux modèles, ce qui est essentiel pour mener à bien une comparaison de qualité.

### **2.1.7 Calibration automatique**

#### **2.1.7.1 Usages antérieurs en hydraulique et hydrologie**

La calibration est mentionnée par Vidal et al. (2007) comme une étape cruciale et coûteuse en temps de la modélisation des écoulements à surface libre. Les auteurs proposent une série de lignes directrices pour la calibration automatique qui sont intégrées dans un outil de calibration pour modèles 1D. Fabio et al. (2010) ont utilisé le logiciel de calibration automatique PEST pour calibrer le modèle bidimensionnel d'une crue de la rivière Mulde en Allemagne. Les auteurs relèvent que des changements dans la définition des paramètres de calibration peuvent mener à différentes configurations ayant la même valeur pour ce qui est de la fonction objective. Cela

soulève l'importance d'imposer des valeurs physiquement réalistes à l'outil de calibration, ce qui est aussi mentionné par Vidal et al. (2007). Ellis et al. (2009) ont utilisé PEST pour la calibration automatique d'un modèle de qualité des eaux et soulignent l'avantage que le modèle a de pouvoir fournir une analyse d'incertitude qui soit compréhensible, quantifiable et facilement communicable. McKibbin et Mahdi (2010) présentent un outil de calibration automatique basé sur PEST et le logiciel 1D d'écoulement à surface libre et de transport de sédiments MHYSER. L'outil est appliqué avec succès à l'hydrodynamique et au transport de sédiments de la rivière Romaine, au nord du Québec. McCloskey et al. (2011) présentent également un cas d'application du logiciel PEST à un modèle hydrologique de la grande barrière de corail.

#### **2.1.7.2 PEST**

PEST (Doherty 2005) est un modèle qui permet la calibration automatique et l'analyse de sensibilité de tout modèle fonctionnant sur la base de fichiers entrants et sortants. Une calibration automatique à l'aide de PEST requiert trois types de fichiers : fichier gabarit, d'instruction et de contrôle (figure 2.1).

- Les fichiers gabarit font office de modèles pour PEST lors de la création des fichiers entrants du modèle (SRH-2D ou HYDRO\_AS-2D)
- Les fichiers d'instructions guident PEST dans l'interprétation des résultats du modèle en indiquant quelles valeurs doivent être utilisées pour la calibration.
- Le fichier contrôle contient des instructions comme les critères d'arrêt, les valeurs observées et fait le lien entre les fichiers gabarit et instructions et les fichiers correspondants du modèle.

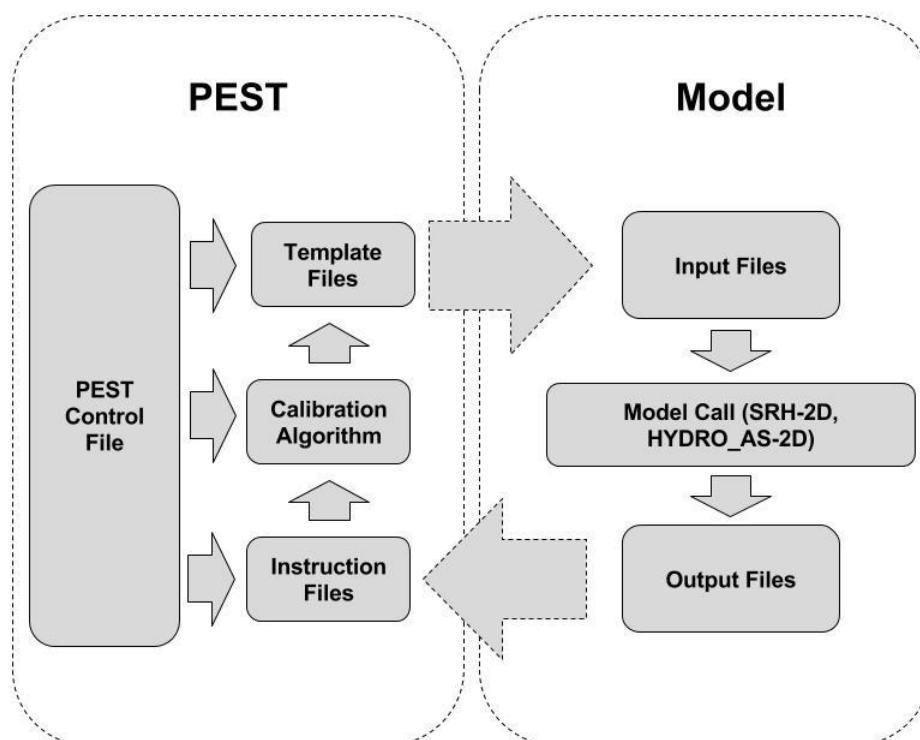


Figure 2.1. Fonctionnement de PEST (tiré de Lavoie et Mahdi (2016)– article en soumission)

PEST est donc indépendant du modèle calibré et est d'une relative facilité d'utilisation, ce qui en fait un outil très puissant pour la calibration de modèles hydrodynamiques bidimensionnels.

## 2.2 Modélisation physique

La multiplication des modèles numériques rend nécessaire la création de données expérimentales sans lesquelles la validation des algorithmes n'est pas possible. Alcrudo et Mulet (2004) présentent les conclusions du projet IMPACT WP3 concernant la propagation des inondations et soutiennent que les données terrains ou de laboratoires sont nécessaires à une meilleure compréhension des caractéristiques des écoulements en condition d'inondation extrême ainsi qu'à la validation de modèles numériques.

Du fait de leur importance pour la validation de modèles numériques, des efforts conséquents ont été concentrés ces dernières années sur la modélisation physique des écoulements à surface libre. Ozmen-Cagatay et Kocaman (2011) simulent une rupture de barrage sur un fond plat avec seuil



trapézoïdal et l'utilisent pour comparer les équations de Saint-Venant et la décomposition de Reynolds appliquée aux solutions de l'équation de Navier-Stokes (RANS) et ce, en utilisant le logiciel Flow-3D. Ozmen-Cagatay et Kocaman (2010) mènent une expérience similaire avec rupture sur fond complètement plat et concluent que la méthode RANS est plus précise que la résolution des équations de Saint-Venant. LaRocque et al. (2013) utilisent une rupture de barrage pour comparer les méthodes RANS et du volume de contrôle. Oertel et Bung (2012) valident également la méthode du volume de contrôle sur une rupture de barrage. Aureli et al. (2008) modélisent une rupture de barrage expérimentalement et à l'aide d'un code par volumes finis. Soares-Frazão (2007) rend disponibles les données expérimentales d'une rupture de barrage sur un fond horizontal avec seuil triangulaire puis contre un obstacle isolé (Soares-Frazão and Zech 2007). Soares-Frazão et Zech (2008) et Testa et al. (2007) étudient finalement ce type d'écoulement en situation urbaine.

Une certaine attention a également été portée à la modélisation de l'écoulement autour d'une butée. Duan (2009) étudie l'écoulement turbulent tridimensionnel et son champ de vitesse autour d'une saillie. Dey et Barbhuiya (2005) font une expérience similaire avec écoulement autour d'une butée rectangulaire.

Ces comparaisons entre modèles physiques et numériques sont très intéressantes et utiles pour faire progresser la compréhension du phénomène. On note cependant que le calcul du coefficient de rugosité de Manning se voit donner peu d'attention et est rarement expliqué clairement, ce paramètre étant généralement dérivé d'études précédentes. Cette situation est étonnante étant donné que ce coefficient est présenté par Warmink et al. (2010) comme un des éléments ayant le plus d'influence sur la qualité d'une modélisation numérique en hydraulique fluviale.

## **CHAPITRE 3 DÉMARCHE DU TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT**

La comparaison des trois modèles, SRH-2D, HYDRO\_AS-2D et HSL-2D, requiert des données expérimentales acquises en milieu contrôlé qui sont fiables et dont tous les paramètres sont connus. De telles données sont précieuses et essentielles puisqu'elles permettent de réduire au maximum les inconnues lors des modélisations numériques subséquentes. Dans le cadre de ce projet, les modèles sont comparés sur deux groupes de données expérimentales différents. Le premier groupe de données est issu d'expérimentations réalisées au *Laboratoire d'hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal* et présenté au chapitre 4 – Article 1 tandis que le second groupe est fourni par Soares-Frazão (2007) et représente une rupture de barrage sur fond plat avec seuil triangulaire. La comparaison des deux modèles est d'abord menée au chapitre 5 sur les données maison de l'article 1 et est poursuivie sur les données de Soares-Frazão (2007) au chapitre 6 - article 2. Le chapitre 7 agrmente la comparaison en y ajoutant, pour les mêmes cas-tests, les résultats du modèle HSL-2D.

### **3.1 Chapitre 4 - Article 1 - Manning's Roughness Coefficient Determination in Laboratory Experiments Using 2D Modeling and Automatic Calibration**

L'article 1 présente l'acquisition de données expérimentales et les met à disposition afin de permettre la validation de modèles numériques. Trois configurations de canaux sont considérées, soit un canal plat, avec seuil triangulaire puis avec butée triangulaire. Chacune étant étudiée avec trois débits permanents croissants pour un total de neuf groupes de données. Il est relevé dans la revue de littérature que le calcul du coefficient de rugosité de Manning se voit généralement accorder peu d'attention dans les articles similaires d'expérimentations en laboratoires. Une attention particulière est donnée à la définition de ce paramètre qui est déterminé à l'aide d'une nouvelle méthode, la calibration automatique. Cet article constitue la première partie de ce projet et s'y inscrit naturellement puisqu'il permet la création de données essentielles pour une comparaison fiable de modèles hydrodynamiques. Ses contributions sont les suivantes :

- Création et diffusion d'un ensemble de données expérimentales fiables et exhaustives considérant à la fois des modifications de la configuration du canal et du débit.

- Proposition d'une nouvelle méthode pour déterminer le coefficient de rugosité de Manning lors d'études expérimentales.

### **3.2 Chapitre 5 – Comparaison en écoulement permanent de SRH-2D et HYDRO\_AS-2D**

La revue de littérature a permis de soulever le fait que, bien que les modèles soient validés par leurs concepteurs, ceux-ci sont rarement comparés entre eux. De telles comparaisons sont pourtant d'une grande aide pour les ingénieurs devant choisir un modèle hydrodynamique. Le chapitre 5 présente une première comparaison des deux modèles avec pour base les données obtenues et présentées dans le chapitre 4–Article 1. Les configurations 2 et 3, avec butée et seuil, sont modélisées avec SRH-2D et HYDRO\_AS-2D avec le débit maximum relevé pour chacune d'elles en utilisant les coefficients de Manning déterminés à l'article 1. Une analyse de sensibilité est menée sur le pas de temps et la densité du maillage.

Ce chapitre établit un lien entre les deux articles en utilisant les données du premier pour mener une comparaison préliminaire qui est poursuivie dans le deuxième.

### **3.3 Chapitre 6 - Article 2 - Comparison of two-dimensional Flood Propagation Models : SRH-2D and HYDRO\_AS-2D**

L'article 2 complète la comparaison des deux modèles qui a été amorcée dans le chapitre 5 en utilisant les données de rupture de barrage de Soares-Frazão (2007). La comparaison est menée sur la précision des profondeurs d'eau calculées ainsi que sur le temps de calcul. La réponse des deux modèles à une calibration automatique du coefficient de Manning est également étudiée, c'est-à-dire qu'on cherche à voir si les modèles sont capables de retrouver le coefficient tel que fourni par l'article de référence (Soares-Frazão 2007).

Cet article permet de conclure, conjointement avec le chapitre 5, sur la qualité des deux modèles commerciaux ainsi que leur efficacité et donne lieu à la contribution suivante :

- Comparaison de deux modèles hydrodynamiques, SRH-2D et HYDRO\_AS-2D, pouvant servir de base objective à tout ingénieur lors du choix d'un modèle.

### **3.4 Chapitre 7 – Comparaison de HSL-2D et des modèles commerciaux**

Le chapitre 7 vient terminer la comparaison en y ajoutant les résultats d'un troisième modèle: HSL-2D basé sur la discrétisation DHD proposée par Cea et Blade (2015). HSL-2D est codé en langage MATLAB et est appliqué aux mêmes cas d'écoulements permanents et non permanent utilisés précédemment avec SRH-2D et HYDRO\_AS-2D. Afin de voir comment réagit le modèle à un cas plus complexe d'écoulement en rivière, le modèle maison est utilisé pour un cas de rivière et est comparé aux résultats fournis par les modèles SRH-2D et HYDRO\_AS-2D. Ce chapitre permet ainsi de valider un modèle maison et de voir comment une discrétisation simplifiée peut se comparer à des modèles commerciaux.

### **3.5 Note**

Tous les calculs présentés dans ce mémoire sont réalisés sur un serveur de 64 GB muni d'un processeur Intel Xeon CPU E5-2630 v3 @2.40 GHz.

## **CHAPITRE 4     ARTICLE 1 – MANNING’S ROUGHNESS**

### **COEFFICIENT DETERMINATION IN LABORATORY EXPERIMENTS**

### **USING 2D MODELING AND AUTOMATIC CALIBRATION**

*Article soumis au Journal Canadien de génie civil en date du 9 novembre 2016*

Basile Lavoie<sup>1</sup>, Tew-Fik Mahdi Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM), École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada. Email: basile.lavoie@polymtl.ca

<sup>2</sup> Professor, Département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM), École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada (Corresponding author). Email: tewfik.mahdi@polymtl.ca

#### **ABSTRACT**

Reliable experimental data are essential for choosing and validating numerical models. Although numerous data sets have been presented in the literature, few have been made widely available to the scientific community. Additionally, these experimental data sets have generally given little attention to the determination of Manning’s Roughness coefficients. This paper addresses these two issues. Three channel configurations are studied: a flatbed channel, a channel with a triangular sill and a channel with a triangular abutment. Three increasing permanent discharges are used for each configuration, leading to nine test cases. The Manning’s coefficients are determined using three methods: the traditional step method, automatic calibration considering theoretical value intervals and automatic calibration ignoring these intervals. The results show that automatic calibration with theoretical value intervals is advantageous compared to the step method. Automatic calibration ignoring theoretical intervals yields low errors but unphysical values; therefore, it is not recommended.

**AUTHOR KEYWORDS:** Laboratory experiments; Flow modeling; Automatic calibration; Triangular sill; Triangular abutment

## 4.1 Introduction

Numerical modeling is becoming increasingly interesting for hydraulic engineers because of its speed and ease of use. Available numerical models are numerous; therefore, reliable experimental data sets are needed that allow for model validation and choice of a specific model.

This paper presents the production of a data set via the steps encountered in laboratory experimentation and data processing. Experiments in the hydraulic laboratory of the *École Polytechnique de Montréal* use three channel configurations, in which three increasing permanent discharges are studied, for a total of nine cases. The three configurations include a flatbed channel, a channel with a triangular sill, and a channel with a triangular abutment.

Particular attention is paid to the determination of the Manning's roughness coefficient. Several methods have been proposed to determine this parameter (Chow 1959; French 1987; Henderson 1966):

1. The Soil Conservation Service Method, in which a basic coefficient is modified by correction factors
2. The use of theoretical tables
3. The photographic method, in which the channel is compared to other channels with known resistance values
4. Velocity measurements
5. The use of empirical formulas relating Manning's coefficient to bed material size
6. Measurement of water levels and calculation of energy slopes (step method)

The last method remains the most commonly used for experimentation in laboratory channels. As part of this study, this method is compared to a new method, automatic calibration, with or without regard to theoretical values. Automatic calibration is used in hydrologic and hydrodynamic studies (Ellis et al. 2009; Fabio et al. 2010; McCloskey et al. 2011), but this is the first time, to the authors' knowledge, that it has been applied to retrieve Manning's roughness coefficients in a laboratory experiment.

After a brief review of the available experimental data sets for numerical model validation, the paper details the experimental setup. The testing procedure is then covered, after which the

various calculations necessary to identify Manning's roughness coefficient values are discussed. The results are then presented. They can be used in test cases to validate numerical models. Finally, concluding remarks and various recommendations are made.

## 4.2 Background

Many researchers have participated in the creation and dissemination of experimental data. These data sets are typically used for 1D, 2D or 3D numerical model validation.

In recent years, considerable efforts have focused on experimental and numerical modeling of transient dam-break flows. Ozmen-Cagatay et Kocaman (2011) simulated a dam break on a horizontal bed with a trapezoidal sill and used it to compare the Reynolds-Averaged Navier Stokes and Shallow-Water equations using the CFD software Flow-3D. Similar experiments were conducted by Ozmen-Cagatay et Kocaman (2010) and LaRocque et al. (2013). Aureli et al. (2008) modeled a dam break with laboratory experiments and a finite volume code. Oertel et Bung (2012) used the observations of a dam break to validate the volume of fluid method (VOF). Soares-Frazão (2007) modeled this type of flow along a horizontal bed with a triangular sill and then against an isolated obstacle (Soares-Frazão et Zech 2007). Soares-Frazão et Zech (2008) and Testa et al. (2007) finally studied dam-break waves in idealized urban situations.

The flow around an abutment has also been given some attention. Duan (2009) studied the three-dimensional turbulent flow created around a spur dike by measuring its velocity field. Dey et Barbhuiya (2005) performed a similar experiment around a rectangular abutment.

Although all of these data sets and experiments can be effectively used to validate numerical methods and improve the understanding of the associated phenomena, careful observations raise the issue of determining Manning's roughness coefficient. Indeed, the calculation of this parameter is given relatively little attention and is never clearly explained. It is generally derived from previous experiences. This is surprising, given that it is mentioned as one of the most influential parameters in the final solutions of numerical simulations (Warmink et al. 2010). We also note that these data sets are not always made available to the scientific community; however, this issue is of great importance considering the proliferation of numerical models and the need for subsequent validation.

These two observations motivate this paper, which emphasizes calculating the Manning's roughness coefficient and providing reliable and high-quality data.

## **4.3 Experimental Setup**

### **4.3.1 Instrumentation**

Geometric levels and water depth measurements are carried out using a mic+340/DIU/TC sensor with an operating range of 350 to 5000 mm and an accuracy of 1% (Microsonic 2015). The flow is measured with a MAG 910E electromagnetic flowmeter, which can be applied to any conductive liquid flow (OmniInstruments 2015). The accuracy of the device is 1% for the range of flow rates used.

### **4.3.2 Channel Configurations**

Three different channel configurations are used in this study. All of them were built in the *Hydraulic Laboratory* at *École Polytechnique de Montréal*. We use a rectangular flatbed channel with a steel bottom and glass walls, which is successively modified by adding a triangular sill and a triangular abutment. These modifications aim to gradually create a more complex flow. The initial geometry and the two modifications are described hereafter.

#### **4.3.2.1 First Configuration – Initial Flatbed Channel**

The initial channel is composed of glass walls and a steel flatbed. The zone where the flow is studied is identified in figure 4.1. It has a length of 6.70 m, a width of 0.762 m and a depth of 0.764 m. Two cracks of equal dimensions are present in both channel walls at a distance of 0.882 m from the inlet boundary (figure 4.2), and they add a two-dimensional component to the flow. These cracks were used to support a weir in previous experiments.



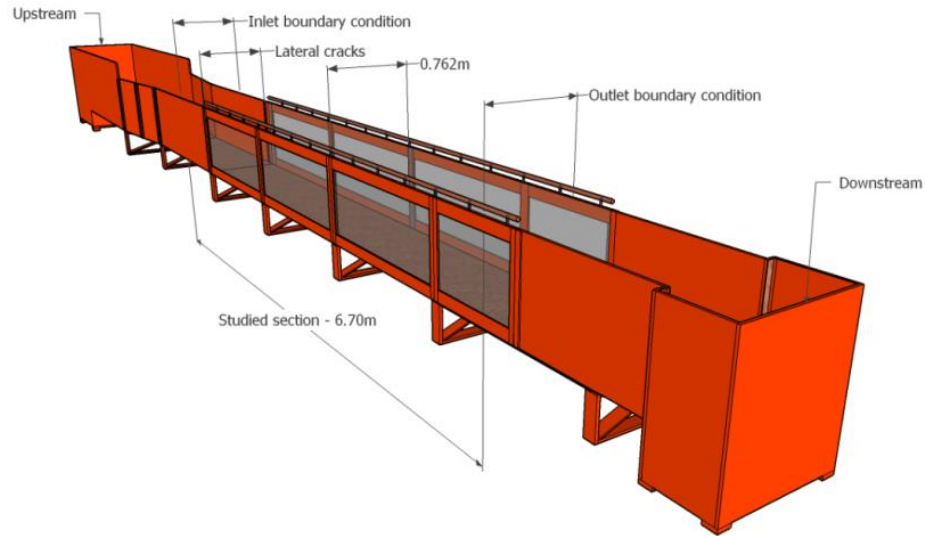


Figure 4.1. Initial flatbed channel

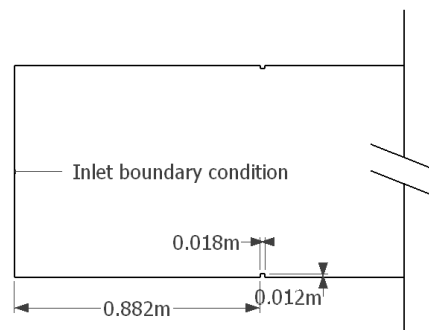


Figure 4.2. Cracks geometry

The channel is relatively old; thus, the bed has been slightly modified over the years by corrosion. Therefore, a geometric survey is performed in 73 locations, improving the knowledge of the exact channel profile. Figure 4.3 shows these points and 24 points where the water depth was also surveyed. The blue dots represent locations where only the bed elevation is known, and red dots show locations where both the elevation and the water depth are known. These measures can be easily imported into any meshing software.

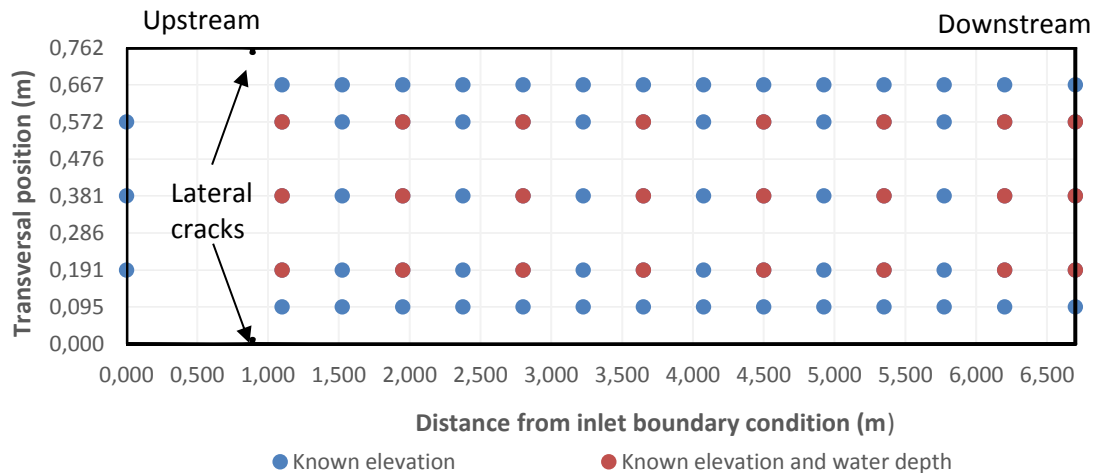


Figure 4.3. First configuration - Positions of geometric and water depth surveys

#### 4.3.2.2 Second Configuration – Triangular Sill

The second studied configuration was created by adding a wooden triangular sill in the lower part of the initial channel. The sill has a length of 0.47 m and an average height of 0.126 m. Its crest is located 5.57 m downstream of the inlet boundary (figure 4.4). A similar configuration was used for transient flow by Soares-Frazão (2007).

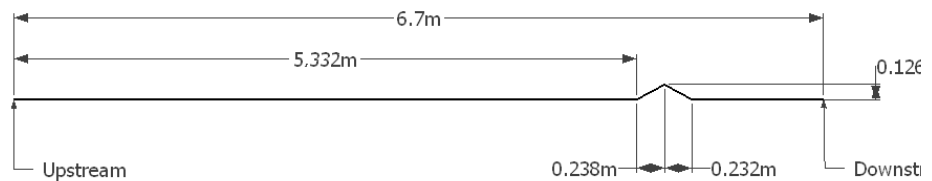


Figure 4.4. Flow over a triangular sill (left) – Second configuration, sectional view (right)

The geometrical survey used for the first configuration is upgraded by modifying 10 measurement points and adding 25 others, which brings the geometrical survey of the second configuration to a total of 98 points. There are 30 locations where the water depth is also known (figure 4.5).

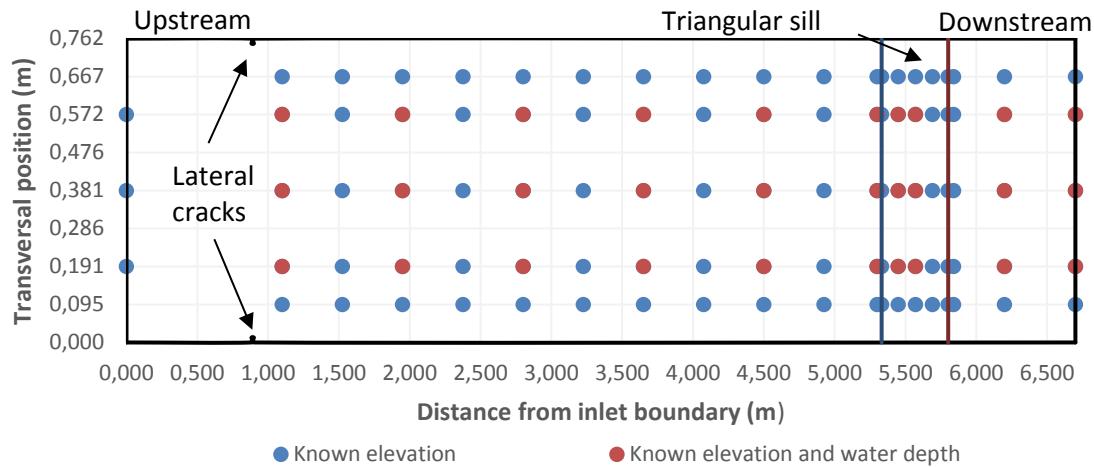


Figure 4.5. Second configuration - Positions of geometric and water depth surveys

#### 4.3.2.3 Third Configuration – Triangular Abutment

The last channel configuration is created by adding a wooden triangular abutment in the upper part of the initial channel. The abutment is symmetrical, and it has a maximum width of 0.126 m and a length of 0.48 m. Its crest is located 2.255 m from the inlet boundary (figure 4.6).

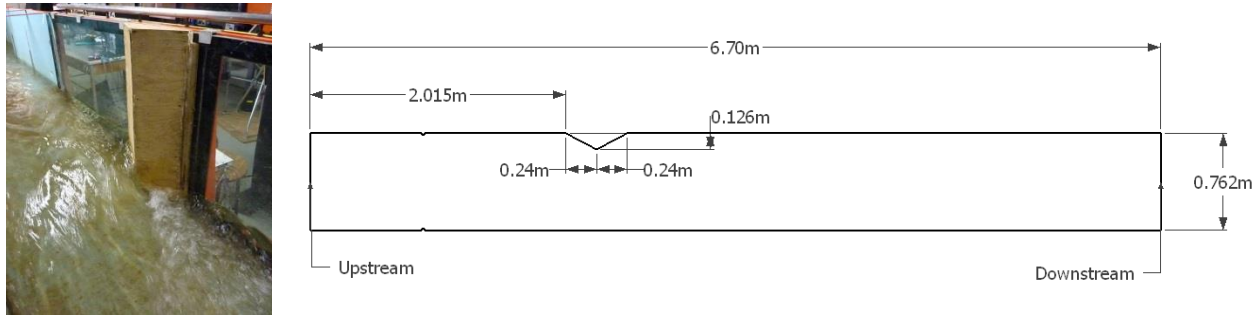


Figure 4.6. Third configuration – Flow around a triangular abutment (left) – Plan view (right)

The geometrical survey used for that last case is the same as the one presented for the first configuration. Only the channel boundaries need to be modified to represent the abutment. Dey et Barbhuiya (2005) showed that a vertical wall abutment induces a highly three-dimensional velocity field, which may not be well represented by a two-dimensional model such as SRH-2D. Therefore, the 24 locations where the water depth is measured are modified to account for the abutment's influence on the flow (figure 4.7).

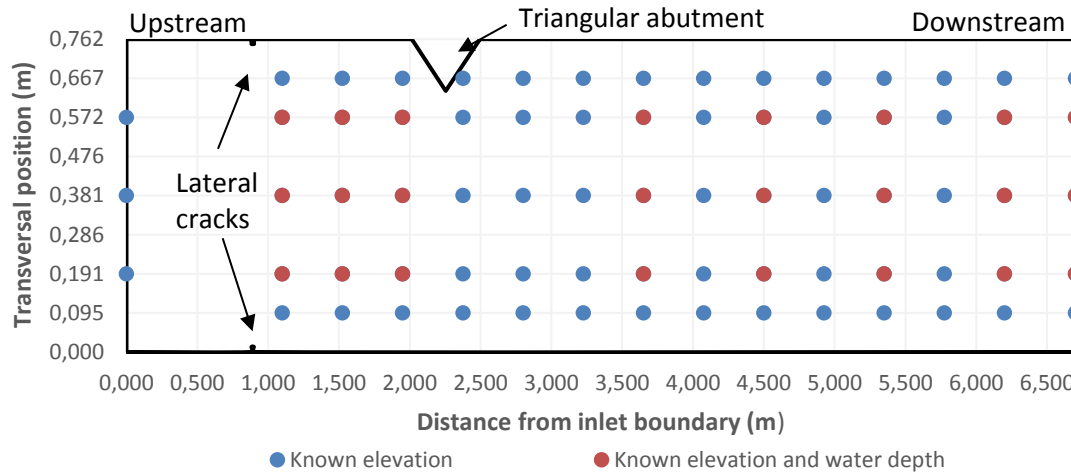


Figure 4.7. Third configuration - Positions of geometric and water depth surveys

### 4.3.3 Experiments

Three permanent discharges are used for each configuration presented above, leading to a total of nine different cases. These are gradually increased and will be referred to as minimum, medium and maximum discharges. To ensure steady state flow, experiments only begin after the sensor reading of the water surface elevation stabilized, which took approximately 10 minutes after opening the valve. The methodology applied for the geometric, water depth and discharge surveys is described hereafter.

#### 4.3.3.1 Geometry

The geometry is measured for the three configurations in the locations previously defined in figure 4.3, figure 4.5 and figure 4.7. The sensor is placed upon a sliding system (figure 4.8), which is moved above the channel to obtain the levels at all determined locations. The sensor takes continuous readings and is therefore left at the same point for at least 20 seconds, allowing subsequent statistical validation and a gain in precision. The sensor gives the distance between its location and the one where the level is needed. The level at a particular point is then given by the subtraction of that distance from the distance of the most distant point, namely, the datum. Because the sensor reacts poorly to large slopes induced by the triangular sill, the coordinates of the sill are interpolated based on the height of its crest and the level of the channel bed.



Figure 4.8. Sensor on the sliding system

#### 4.3.3.2 Water Depth

Water depths are surveyed using the same method as that used for the geometry. The water depth is computed by subtracting the distance from the sensor to the water surface and the distance from the sensor to the channel bed.

#### 4.3.3.3 Discharge

The discharge entering the channel is controlled with a valve and measured by a flow sensor. Because the water depth is not measured simultaneously, an experiment can last up to an hour; therefore, the discharge may show small variations over the duration of the experiment. To verify these variations, discharges are recorded every three minutes and statistically validated after the experiment.

### 4.4 Statistical Treatment

As previously mentioned, every value is represented by a series of measurements of the same phenomenon. A statistical treatment is therefore applied to these series to determine the single value that best represents reality. Protassov (2002) proposed that an experimental value resulting from a finite number of measurements may be expressed via equations 1 and 2:

$$l_{exp} \pm \Delta l \equiv m \pm s_m t_{vp} \quad 4.1$$

$$s_m = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^n (l_i - m)^2 \quad 4.2$$

Where  $l_{exp}$  is the experimental average value;  $\Delta l$  is its uncertainty;  $m$  and  $s_m$  are the average and standard deviation, respectively, of a series of measured values;  $t_{VP}$  is the Student Coefficient;  $N$  is the number of measurements; and  $l_i$  is a measured value.

The following method is applied to the three types of measurements (discharge, water depth and geometry):

1. Computation of the experimental average value ( $l_{exp}=m$ ), experimental standard deviation ( $s_m$ ), number of freedom degrees and Student coefficient ( $t_{VP}$ );
2. Calculation of uncertainty ( $\Delta l$ ).

Changing the datum for every geometry level and water depths requires subtraction, and the sum of the uncertainty is then used as the final uncertainty. The  $x$ - and  $y$ -coordinates are measured with a measuring tape, and half of the smallest measurement level of the tape is used as the uncertainty. Table 4.1 shows that the uncertainties are relatively small, with the highest associated with the  $x$ - and  $y$ -coordinates. The inflows to which they refer are detailed in the *Presentation of Data Sets* section, while the water depths and coordinates are given in appended text files.

Table 4.1. Uncertainties in measured values

Measured value	Maximum uncertainty
Water depth (m)	$3.65 \times 10^{-4}$
Discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$3 \times 10^{-3}$
X-coordinate (m)	$1 \times 10^{-3}$
Y-coordinate (m)	$1 \times 10^{-3}$
Z-coordinate (m)	$1.3 \times 10^{-4}$

Experimental repeatability is verified in the channel with an abutment (third configuration), and all the manipulations and statistical treatments are repeated twice at the medium discharge level. When compared, the two experiments present very small differences for both the discharge (RMSE=0.000678  $\text{m}^3/\text{s}$ ) and water depth (RMSE=0.00022 m, maximum residual=0.00198).

## 4.5 Determination of Manning's Roughness Coefficients

Manning's roughness coefficient is calculated in three different ways: the step method (Henderson 1966), automatic calibration considering the theoretical Manning's value intervals of the channel materials and automatic calibration ignoring the theoretical Manning's value intervals of the channel materials. The step method is applied to the flatbed channel (first configuration) only, and the automatic calibrations are performed for all three configurations. These methods all consider the minimum discharge. The Manning's roughness coefficient is then used for medium and maximum discharges. The validity of this hypothesis is verified in the *Automatic Calibration with Respect to Theoretical Intervals* section.

### 4.5.1 Manning's Coefficient Values – Theoretical Intervals

Manning's coefficient is considered uniform throughout the whole domain of the initial flatbed channel and the channel with the triangular abutment (configurations 1 and 3), while it is composed of two materials for the channel with a wooden triangular sill (configuration 2). These materials are represented based on the Manning's coefficient intervals proposed by Chow (1959) for corrugated metal, wood and glass. Because the main part of the channel is composed of a steel bed with glass walls, the coefficient intervals are computed from the equivalent Manning's constant equation (Chaudhry 2008). These intervals are computed for the channel with the triangular sill at a distance of 1.1 m from the inlet boundary and are also used for the two other configurations. The water depth varies considerably over the sill ( $h_{min}=h_c=0.017$  m and  $h_{max}=0.20$  m), but it occurs over a very short distance (0.47 m). Therefore, no equivalent Manning's coefficient is computed for that location. The Manning's coefficient equation is as follows:

$$n_c = \frac{[\sum P_i n_i^{3/2}]^{2/3}}{P^{2/3}} \quad 4.3$$

Where  $n_c$  and  $P$  are the equivalent Manning's roughness coefficient and wetted perimeter of the whole section, respectively, while  $n_i$  and  $P_i$  are for a subsection associated with a specific material.

In the step method, calibration values are verified with the theoretical intervals created by the maximum and minimum values presented in table 4.2. For automatic calibration, these intervals are used as limiting values.

Table 4.2. Theoretical intervals of Manning's roughness coefficient

Material	Minimum value (s/m <sup>1/3</sup> )	Maximum value (s/m <sup>1/3</sup> )
Corrugated metal <sup>a</sup>	0.021	0.030
Wood <sup>a</sup>	0.010	0.014
Glass <sup>a</sup>	0.009	0.013
Equivalent constant Manning – steel/glass	0.017	0.028

<sup>a</sup>Based on Chow (1959)

#### 4.5.2 Step Method – 1D Flow – Flatbed Channel

This method is only used for the flatbed channel (first configuration) at the minimum discharge. The Manning's coefficient for the equivalent sections made of steel and glass is first computed with the step method (Henderson 1966):

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{J_f - J_e} \quad J_e = \frac{V^2 n^2}{R_h^{4/3}} \quad 4.4 - 4.5$$

Where  $\Delta x$  is the spatial variation in the  $x$ -direction,  $\Delta E$  is the energy variation,  $J_f$  is the bed slope,  $J_e$  is the energy slope and  $R_h$  is the hydraulic radius.

We use the minimum discharge in the initial flatbed channel, for which the Manning's coefficient is calculated in every section bound by two measured water depths. When calculated using the step method, the Manning's roughness coefficients range from 0.012 to 0.017, with an average value of 0.014.

Figure 4.9 presents the difference observed between Manning's roughness coefficient calculated with the step method and that recommended by the theory. The calculated coefficients are slightly below the theoretical values.



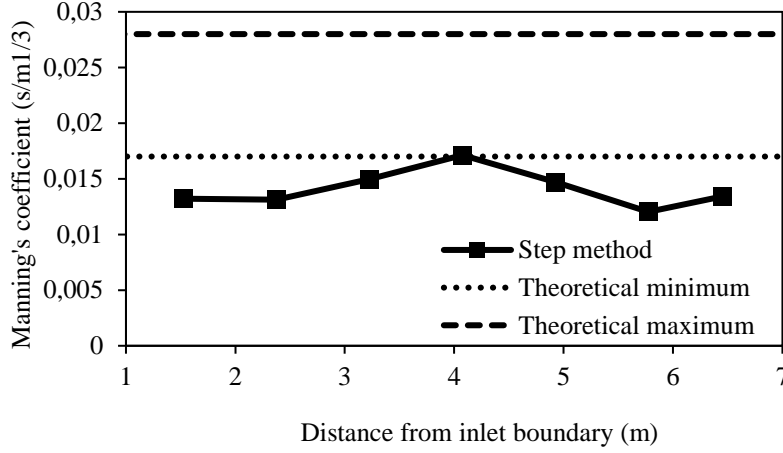


Figure 4.9. Comparison of the theoretical and step methods for calculating Manning's coefficients in the initial flatbed channel

### 4.5.3 Automatic Calibration – 2D Flow – All Configurations

Automatic calibration is used to retrieve Manning's roughness coefficients for the three channel configurations at the minimum discharge. Three models are used in this paper, including the finite-volume code SRH-2D (Lai 2008), the pre-treatment and post-treatment software SMS (AQUAVEO 2016) and the automatic calibration model PEST (Doherty 2005).

#### 4.5.3.1 SRH-2D

SRH-2D solves the shallow-water equations of the following form (Lai 2008).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = e \quad 2.8$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial h v u}{\partial y} = \frac{\partial h T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad 2.9$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial h u v}{\partial x} + \frac{\partial h v v}{\partial y} = \frac{\partial h T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad 2.10$$

The friction is determined using the Manning equation (2.11).

$$\begin{pmatrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{pmatrix} = \rho C_f \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \sqrt{u^2 + v^2} \quad C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad 2.11 - 2.12$$

Boussinesq equations are used to compute the turbulent stresses:

$$T_{xx} = 2(\mu_0 + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}k \quad 2.13$$

$$T_{xy} = (\mu_0 + \mu_t) \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad 2.14$$

$$T_{yy} = 2(\mu_0 + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \quad 2.15$$

where  $h$  is the water depth,  $u$  and  $v$  are the velocity components,  $e$  is a source term,  $T$  is the turbulent stress,  $\tau$  is the shear stress,  $g$  is the gravitational acceleration,  $\rho$  is the mass density,  $\mu_0$  is the kinematic viscosity of water,  $\mu_t$  is the turbulent eddy viscosity and  $k$  is the turbulent kinetic energy.

SRH-2D proposes two turbulence models: the k-epsilon and depth-averaged parabolic models.

#### 4.5.3.2 SMS

The Surface-water Modeling System (SMS; (AQUAVEO 2016) allows the user to execute the required pre-treatment and post-treatment procedures for hydraulic modeling of open channel flow. SMS includes many characteristics of GIS software and uses them for various purposes, such as creating quality meshes. The results can be observed in three dimensions, and many tools are available for their treatment, which makes SMS very versatile and usable with multiple models, such as SRH-2D (AQUAVEO 2016).

#### 4.5.3.3 PEST

PEST (Doherty 2005) is a software that performs automatic calibration and sensibility analysis of any model based on input and output files in binary or text formats. Only the automatic calibration module is used in this paper. Automatic calibration with PEST requires three main types of file: template, instruction and control files.

- Template files act as models for PEST when creating input files to calibrate the model (i.e., SRH-2D).
- Instruction files aid PEST in the interpretation of the model's output by indicating the values that should be used in the calibration.
- The control file contains calibration instructions, such as stopping criteria, and observed values. It relates the template and instruction files to the associated model files.

Therefore, PEST is an independent model that is relatively simple to use, which makes it a powerful tool for the calibration of two-dimensional hydrodynamic models.

#### 4.5.3.4 Flow Modeling

The meshes are composed of triangular elements with an average side size of 0.05 m. Based on the channel, meshes have lengths of 6.7 m and widths of 0.762 m. Boundary conditions are applied as defined in the *Presentation of Data Sets* section and the minimum discharge is used. The total simulation time is 15 minutes, ensuring that the model reaches a steady flow conditions, and the time step is 0.1 seconds for stability purposes. Figure 4.10 shows the three meshes used to model and calibrate the three configurations.

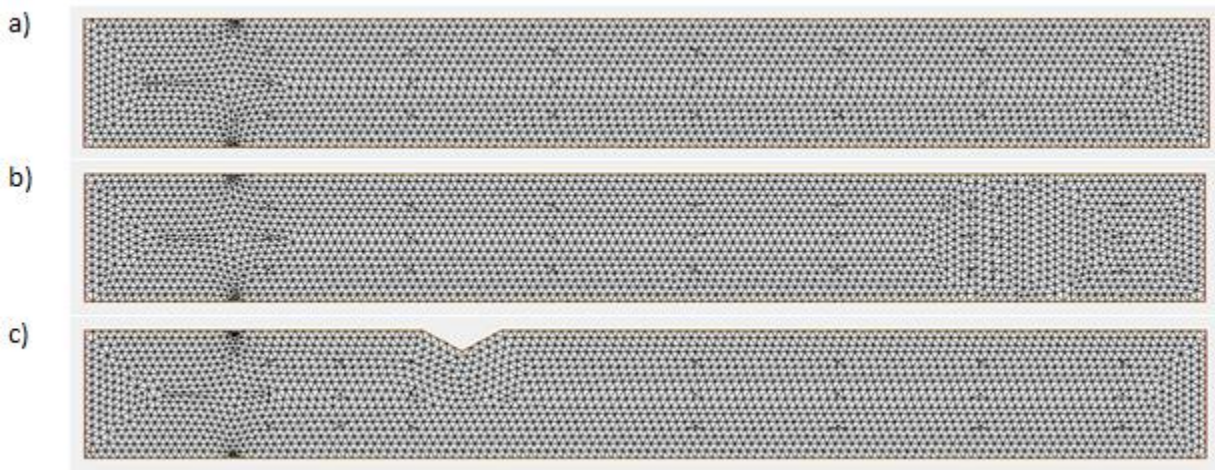


Figure 4.10. Meshes of: Initial flatbed channel (a) channel with the triangular sill (b), channel with the triangular abutment (c)

#### 4.5.3.5 Automatic Calibration with Respect to Theoretical Intervals

Automatic calibration is then performed using theoretical intervals. This method aims to determine Manning's coefficients that minimize the difference between observed and modeled water depths, while maintaining values that are physically representative of the real channel. This method is used for all three channels at the minimum discharge rate. Additionally, all the measured water depths, except the outflow boundary conditions, are used in the calibration, specifically, 21 locations in the flatbed channel and the channel with the abutment and 27 locations in the channel with the triangular sill. When computed in this manner, the coefficients lead to an RMSE that is relatively small for configurations 1 and 3 and a bit higher for configuration 2, likely because the presence of a second material complicates the search for an optimum (table 4.3).

Table 4.3. Manning's coefficients determined with automatic calibration for theoretical intervals

Configuration	Manning's Coefficient ( $\text{s/m}^{1/3}$ )		Error (m)	
	Steel/Glass	Wood	RMSE	Max. Residual
Flatbed channel	0.0170	-	0.0019	0.0032
Channel with sill	0.0174	0.0140	0.0116	0.0215
Channel with abutment	0.0170	-	0.0022	0.0044

To verify whether the Manning's roughness coefficients can be used for all discharges, automatic calibration is performed for the flatbed channel with the maximum discharge. The roughness coefficient determined for the steel/glass compound section is 0.0176, yielding an RMSE of 0.002. These results are very close to those for the minimum discharge (table 4.3), which supports the use of the Manning's coefficients for all discharges.

#### 4.5.3.6 Automatic Calibration Ignoring Theoretical Intervals

To evaluate the impacts of the chosen intervals on the results of the PEST calibration, a second series of calibrations is performed with larger intervals of 0.005 to 0.05 that do not account for the theoretical values. The Manning's roughness coefficients computed for the flatbed channel and channel with the triangular abutment are similar to those calculated previously, and their RMSEs are less than half of the previous values (table 4.4). However, the coefficients calculated

for the channel with the triangular sill are very different but have similar RMSEs. Additionally, these coefficients are inconsistent with the theoretical results because they yield larger roughness values for the wood, which is contradicted by visual inspection. These results emphasize the importance of carefully defining the calibration intervals to prevent the model from converging to a non-physical optimum.

Table 4.4. Manning's coefficients determined with automatic calibration ignoring theoretical intervals

	Manning's Coefficient ( $\text{s/m}^{1/3}$ )		Error (m)	
	Steel/Glass	Wood	RMSE	Max. Residual
Flatbed channel	0.0155	-	0.0007	0.0018
Channel with sill	0.0050	0.05	0.0097	0.0187
Channel with abutment	0.0151	-	0.001	0.0022

#### 4.5.4 Comparison of Calibration Methods

Figure 4.11 compares the errors calculated based on the water depths in the flatbed channel when modeled with SRH-2D via SMS, with Manning's coefficients computed by the three aforementioned methods. The step method gives the most important RMSE, followed by automatic calibration with consideration of theoretical intervals. Both are superior to the automatic calibration that ignores theoretical intervals. However, considering the non-physical values resulting from that method for the channel with the triangular sill, the automatic calibration with chosen intervals remains the best method. The fact that automatic calibration with theoretical intervals provides a smaller RMSE than the step method for the simplest configuration studied, even with a small difference, supports the ability of this method to retrieve Manning's roughness coefficients. Therefore, this method becomes particularly applicable for experimental setups where more than one material is used or setups with two-dimensional flow that are not properly represented by the step method. The possibility of coupling PEST with any model offers the flexibility to find the Manning's coefficient of a certain type of flow with the most appropriate model according to the user's judgement.

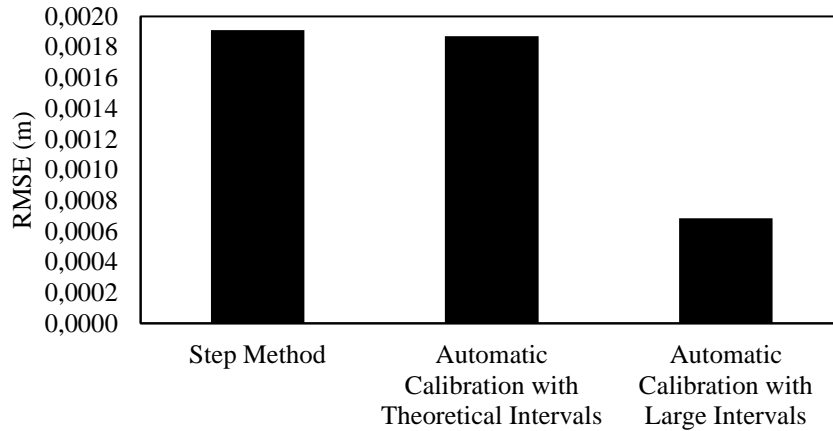


Figure 4.11. Comparison of water depth RMSEs calculated using SRH-2D for the three calibration methods

## 4.6 Presentation of Data Sets

Table 4.5 presents a summary of the available data sets for the three channel configurations. For each configuration, three discharges are available, with corresponding boundary conditions.

Table 4.5. Boundary conditions

Boundary Conditions	Minimum Inflow		Medium Inflow		Maximum Inflow	
	Inlet BC (m <sup>3</sup> /s)	Outlet BC (m)	Inlet BC (m <sup>3</sup> /s)	Outlet BC (m)	Inlet BC (m <sup>3</sup> /s)	Outlet BC (m)
Flatbed channel	0.031	0.074	0.073	0.120	0.101	0.144
Channel with sill	0.041	0.035	0.070	0.055	0.108	0.078
Channel with abutment	0.040	0.086	0.064	0.112	0.100	0.140

The boundary conditions include discharge at the inflow boundary and a water depth at the outflow boundary. The water depth is an average of three measured water depths at the outflow boundary, specifically, 6.7 m from the inlet. Table 4.6 shows the final Manning's roughness coefficients that should be used by the modeler.

Table 4.6. Final Manning's roughness coefficients

Material	Manning's roughness coefficient (s/m <sup>1/3</sup> )
Steel/Glass	0.017
Wood (sill)	0.014

The results are available in three supplemental data text files: S1, S2 and S3. All values are in SI units. The coordinates and water depth are contained in S1 for configuration 1, in S2 for configuration 2 and in S3 for configuration 3. All three files contain three series of water depths, with one for each discharge.

## 4.7 Conclusion

This paper presents the acquisition and processing of the geometric and water depth data in nine flow cases, including three discharges in three channel configurations. These data sets were statistically processed, and the Manning's coefficients were determined by three different methods: calculating the energy slope, automatic calibration taking into account the theoretical coefficient intervals and automatic calibration ignoring these intervals. These three methods are compared, and it appears that automatic calibration is advantageous if it takes into account the theoretical intervals; otherwise, the model may converge to a global optimum that is not physically representative of the situation. The acquired data sets are given in appended text files, and the SMS and SRH-2D files used are available upon request. Users are invited to use these data sets in their studies with proper citation of the source.

## 4.8 Acknowledgment

This research was supported in part by a National Science and Engineering Research Council (NSERC) Discovery Grant, application No: RGPIN-2016-06413.

## 4.9 Notations

The following symbols are used in this paper:

$e$	Source term;
$g$	Gravitational acceleration;
$h$	Water depth;
$J_e$	Energy slope;
$J_f$	Bed slope;
$k$	Turbulent kinetic energy;

$l_{\text{exp}}$	Experimental value (“ell”);
$l_i$	Measured value (“ell”);
$m$	Average measured value;
$N$	Number of measurements;
$n$	Manning’s roughness coefficient;
$n_c$	Equivalent Manning’s roughness coefficient;
$n_i$	Manning’s roughness coefficient of a subsection;
$P$	Wetted perimeter;
$R_h$	Hydraulic radius;
$s_m$	Standard deviation of a series of measured values;
$T$	Turbulence stress;
$t$	Time;
$t_{\text{VP}}$	Student coefficient associated with a degree of freedom and probability;
$u$	Velocity component (x-direction);
$v$	Velocity component (y-component);
$\Delta E$	Energy variation;
$\Delta l$	Uncertainty of an experimental value;
$\Delta x$	Spatial variation in the x-direction;
$\mu_0$	Kinematic viscosity of water;
$\mu_t$	Turbulent eddy viscosity;
$\rho$	Mass density;
$\tau$	Shear stress.

#### 4.10 Supplemental Data

Text files S1-S3 are available in appendices A, B and C.



## 4.11 References

1. «AQUAVEO (2016). "SMS 12.1 - The Complete Surface-water Solution." <<http://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction>>. (March 10, 2016).
2. Aureli, F., Maranzoni, A., Mignosa, P., and Ziveri, C. (2008). "Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:8(1089), 1089-1101.
3. Chaudhry, H. (2008). *Open-Channel Flow*, Springer Science, New-York.
4. Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New-York.
5. Dey, S., and Barbhuiya, K. (2005). "Flow Field at a Vertical-Wall Abutment." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:12(1126), 1126-1135.
6. Doherty (2005). "PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition." *Watermark Numerical Computing*.
7. Duan, J. G. (2009). "Mean Flow and Turbulence around a laboratory Spur Dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000077, 803-811.
8. Ellis, R. J. I., Doherty, J., Searle, R. D., and Moodie, K. (2009). "Applying PEST (Parameter ESTimation) to improve parameter estimation and uncertainty analysis in WaterCAST models." 18th World IMACS/MODSIM Congress, Modelling and Simulation Society of Australia and New-Zealand Inc., 3158-3164.
9. Fabio, P., Aronica, G. T., and Apel, H. (2010). "Towards automatic calibration of 2-D flood propagation models." *Hydrology and Earth System Sciences*, 10.5194/hess-14-911-2010, 911-924.
10. French, R. H. (1987). *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, New-York.
11. Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*, Macmillan Publishing Co., Inc., New-York.
12. Lai, Y. G. (2008). "SRH-2D version 2: Theory and User's Manual." U.S. Department of the interior - Bureau of Reclamation, Denver.
13. LaRocque, L. A., Imran, J., and Chaudhry, M. H. (2013). "Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000705, 569-579.
14. McCloskey, G. L., Ellis, R.J., Waters, D. K., and Stewart, J. (2011). "PEST hydrology calibration process for source catchments - applied to the Great Barrier Reef, Queensland." 19th International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New-Zealand Inc., 2359-2366.
15. Microsonic (2015). "mic+340/IU/TC." <<http://www.microsonic.de/en/distance-sensors/cylindrical/micplus/standard-sensors/standard-sensors/micplus340iutc.htm>>. (March, 12, 2016).

16. Oertel, M., and Bung, D. (2012). "Initial stage of two-dimensional dam-break waves: laboratory versus VOF." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2011.639981, 89-97.
17. OmniInstruments (2015). "MAG 910 Electromagnetic Flowmeter." <<http://www.omniinstruments.co.uk/flow-meters/electromagnetic-flow-meters-magnetic-flow-meters/mag910e-magnetic-flowmeter.html>>. (March, 12, 2016).
18. Ozmen-Cagatay, H., and Kocaman, S. (2010). "Dam break flows during initial stage using SWE and RANS approaches." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2010.507342, 603-611.
19. Ozmen-Cagatay, H., and Kocaman, S. (2011). "Dam-Break Flow in the Presence of Obstacle: Experiment and CFD Simulation." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10.1080/19942060.2011.11015393, 541-552.
20. Protassov, K. (2002). *Analyse statistique de données expérimentales*, EDP Sciences, Les Ulis.
21. Soares-Frazão, S. (2007). "Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2007.9521829, 19-26.
22. Soares-Frazão, S., and Zech, Y. (2007). "Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2007.9521830, 27-36.
23. Soares-Frazão, S., and Zech, Y. (2008). "Dam-break flow through an idealised city." *Journal of Hydraulic Research*, 10.3826/jhr.2008.3164, 648-658.
24. Testa, G., Zuccalà, D., Alcrudo, F., Mulet, J., and Soares-Frazão, S. (2007). "Flash flood flow experiment in a simplified urban district." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2007.9521831, 37-44.
25. Warmink, J. J., Van der Klis, H., Booij, M. J., and Hulscher, S. J. M. H. (2010). "Identification and Quantification of Uncertainties in a Hydrodynamic River Model Using Expert Opinions." *Water Resources Management*, 10.1007/s11269-010-9716-7, 601-622.

## **CHAPITRE 5 COMPARAISON EN RÉGIME PERMANENT DE SRH-2D ET HYDRO\_AS-2D**

Ce chapitre constitue la première partie de la comparaison des deux modèles commerciaux qui est effectuée sur les écoulements en régime permanent dont l'acquisition des données a été décrite au chapitre 4 – Article 1. Les configurations 2 et 3, avec seuil et butée triangulaires, sont modélisées avec SRH-2D et HYDRO\_AS-2D en utilisant leur débit maximum respectif. Les coefficients de rugosité de Manning utilisés sont ceux déterminés dans l'article à l'aide du modèle de calibration automatique PEST, soit un Manning de  $0.017 \text{ s/m}^{1/3}$  pour le fond du canal en acier et de  $0.014 \text{ s/m}^{1/3}$  pour le seuil triangulaire en bois.

Les modélisations sont comparées aux écoulements expérimentaux à l'aide de la *Root Mean Square Error* (RMSE) qui se base sur 24 données expérimentales de profondeurs d'eau pour le canal avec seuil et 21 données pour le canal avec butée.

Chaque modélisation a une durée de 10 minutes de façon à assurer l'atteinte d'un régime permanent et la turbulence est représentée par le modèle parabolique qui est le seul supporté par HYDRO\_AS-2D, cela afin de réduire les différences entre les deux modèles comparés.

Le débit constant imposé comme condition amont est de  $0.108 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le canal avec seuil et de  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le canal avec butée. À noter qu'il est nécessaire d'imposer une vitesse uniforme tout au long de la condition frontière pour SRH-2D sans quoi la modélisation montre des instabilités. La profondeur d'eau et condition aval est de  $0.078 \text{ m}$  pour le canal avec seuil et de  $0.14 \text{ m}$  pour le canal avec butée.

Trois maillages sont utilisés pour la comparaison (figure 5.1), leur densité est de  $102 \text{ mailles/m}^2$  pour le maillage grossier (M1),  $250 \text{ mailles/m}^2$  pour le maillage moyen (M2) et de  $1010 \text{ mailles/m}^2$  pour le maillage fin (M3). Les modélisations sont menées avec trois pas de temps de  $0.1\text{s}$ ,  $0.01\text{s}$  et  $0.001\text{s}$  pour SRH-2D tandis que HYDRO\_AS-2D calcule lui-même le pas de temps nécessaire à la stabilité numérique.

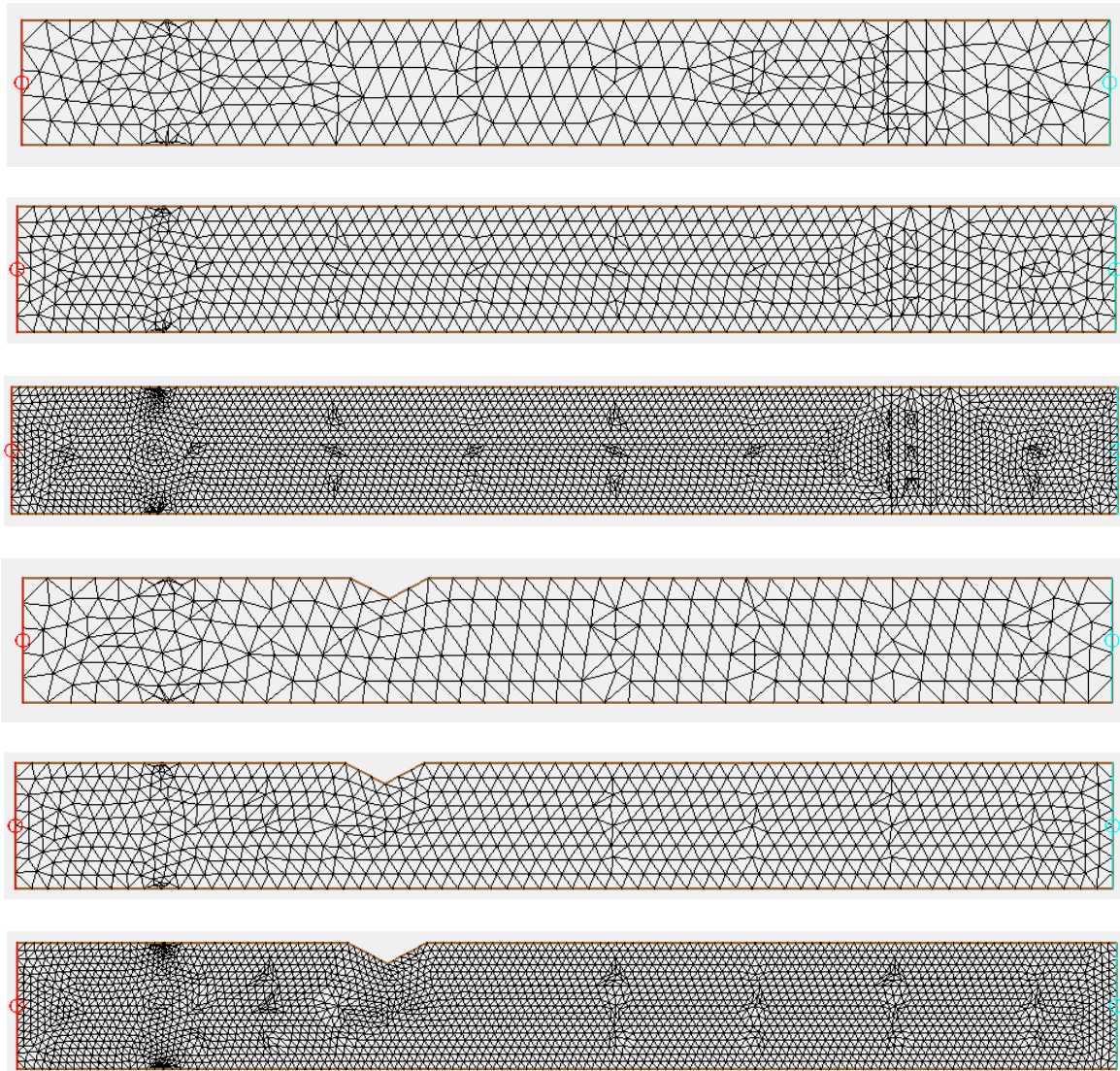


Figure 5.1. De haut en bas - Maillages : grossier, moyen puis fin pour canal avec seuil (configuration 2) et grossier, moyen puis fin pour canal avec butée (configuration 3).

Il est nécessaire, pour les deux écoulements de ce chapitre seulement, d'utiliser le module 1-Step de HYDRO\_AS-2D afin d'éviter des instabilités qui se manifestent avec le module principal de HYDRO\_AS-2D. 1-Step est d'ailleurs recommandé par le fournisseur pour la modélisation d'écoulements permanents puisque plus rapide.

La suite du présent chapitre présente la comparaison des résultats obtenus avec SRH-2D et HYDRO\_AS-2D pour les deux configurations du canal.

## 5.1 Configuration 2 – Canal avec seuil triangulaire

### 5.1.1 Profondeur d'eau

Lorsque la modélisation est menée avec SRH-2D, la RMSE de la profondeur d'eau est réduite par un facteur de 2.7 par le raffinement du maillage tandis que la réduction du pas de temps n'a pratiquement aucune influence sur les résultats à savoir que l'indépendance du modèle au pas de temps est atteinte (figure 5.2). Il semble même que le résultat soit légèrement dégradé par un pas de temps trop fin avec le maillage le plus grossier. Les résultats du premier pas de temps (0.1 s) sont donc utilisés pour la suite de la comparaison.

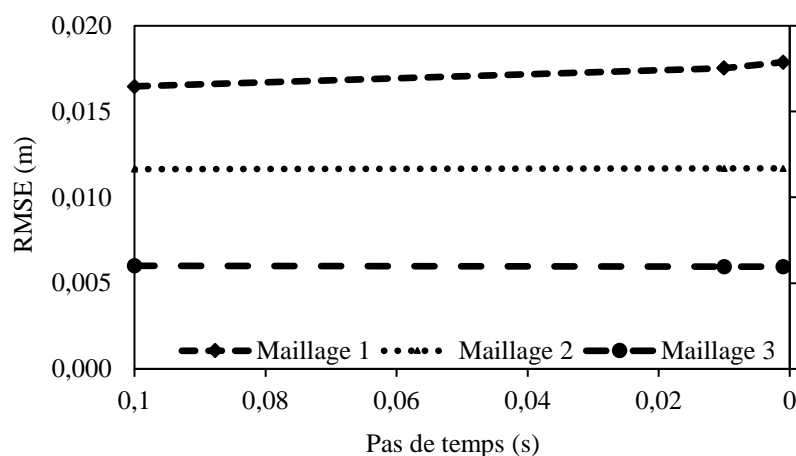


Figure 5.2. Analyse de sensibilité au pas de temps et à la densité du maillage pour SRH-2D – Configuration 2

La figure 5.3 présente l'évolution de l'erreur en fonction de la densité du maillage pour HYDRO\_AS-2D et montre une dégradation importante des résultats entre les maillages 2 et 3 alors que la RMSE passe de 0.008 m à 0.012 m.

Ces résultats sont contre-intuitifs étant donné que le raffinement du maillage mène théoriquement à une réduction de l'erreur de discrétisation puisque l'approximation des équations de Saint-Venant approche la solution exacte. Des résultats similaires ont cependant été observés précédemment par Družeta et al. (2009) et Boz et al. (2014). Les erreurs d'arrondi peuvent être mises en cause puisque celles-ci sont susceptibles d'apparaître lorsqu'une modélisation fait appel à un nombre très important d'opérations ou à des valeurs très petites (Pichat et Vignes 1993). À cela s'ajoute le fait que la parallélisation qui est appliquée par HYDRO\_AS-2D augmente le

risque d'accumulation des erreurs d'arrondis. Eberhart et al. (2016) expliquent notamment que l'amélioration des ressources informatiques mène à une augmentation du nombre d'opérations impliquant des nombres à virgule flottante, en particulier dans le cas d'applications parallélisées. Chaque opération pouvant induire une erreur d'arrondi, l'accumulation de ces erreurs en est donc amplifiée. Družeta et al. (2009) proposent une autre hypothèse selon laquelle la densification du maillage permettrait bel et bien de converger vers la solution exacte qui serait cependant partiellement non-physique du fait des hypothèses de base des équations de Saint-Venant (la répartition des pressions est hydrostatique, la pente du fond est faible, les caractéristiques géométriques sont constantes sur une cellule, les effets 3D sont négligés et la pente d'énergie peut être approximée avec une équation comme celle de Manning). Cette hypothèse est cependant peu probable puisque SRH-2D a pu, avec les mêmes densités de maillage, constamment réduire son erreur de modélisation. Dans ce cas, HYDRO\_AS-2D semble donc mal réagir à un raffinement intense.

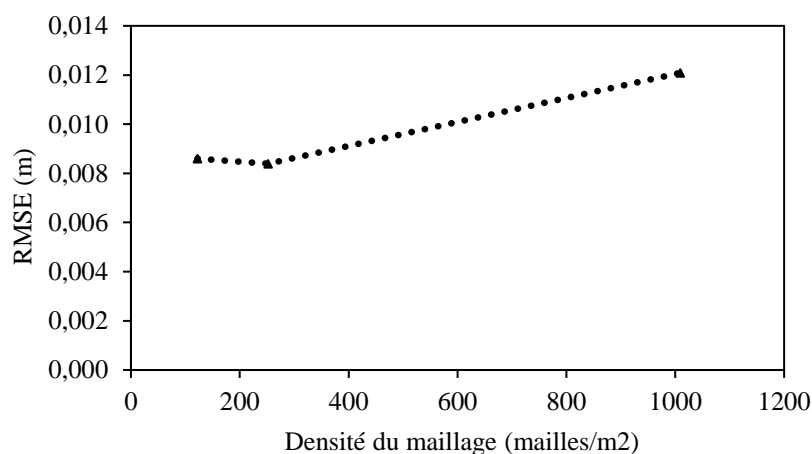


Figure 5.3. Analyse de sensibilité à la densité du maillage pour HYDRO\_AS-2D – Configuration 2

Les RMSE de SRH-2D et HYDRO\_AS-2D sont ensuite comparées pour les trois maillages (figure 5.4) avec des résultats variables. En effet, HYDRO\_AS-2D est plus précis pour les maillages 1 et 2 qui sont moins denses tandis que SRH-2D a l'avantage pour le maillage fin (M3).

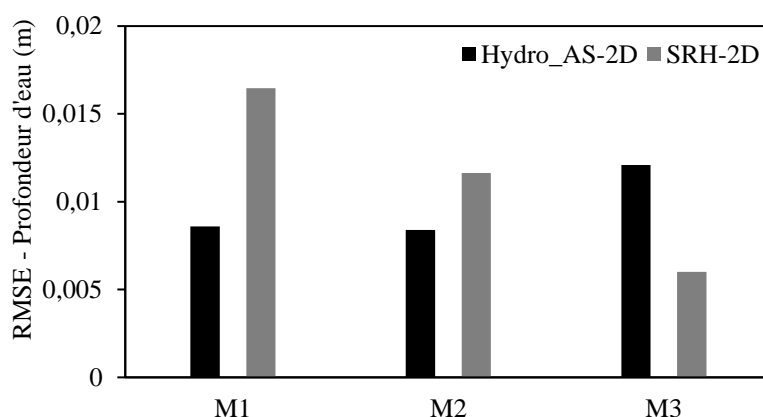


Figure 5.4. RMSE sur la profondeur d'eau – Configuration 2

Il est également intéressant d'étudier l'erreur en considérant uniquement les points jaugés situés à proximité du seuil puisqu'il s'agit de la partie du canal la plus difficile à modéliser. La figure 5.5 montre ces résultats pour lesquels seuls les 9 points situés sur le seuil sont utilisés.

Les erreurs sont globalement plus élevées par rapport à ce qui est obtenu en utilisant tous les points jaugés et ce, pour les deux modèles. On constate que les erreurs demeurent similaires pour le maillage le plus fin, ce qui permet à HYDRO\_AS-2D d'avoir une erreur qui est constamment réduite au fur et à mesure que la densité du maillage est augmentée. La relation entre les deux modèles demeure la même, à savoir que HYDRO\_AS-2D est plus précis pour les deux premiers maillages alors que SRH-2D a l'avantage pour le maillage très fin.

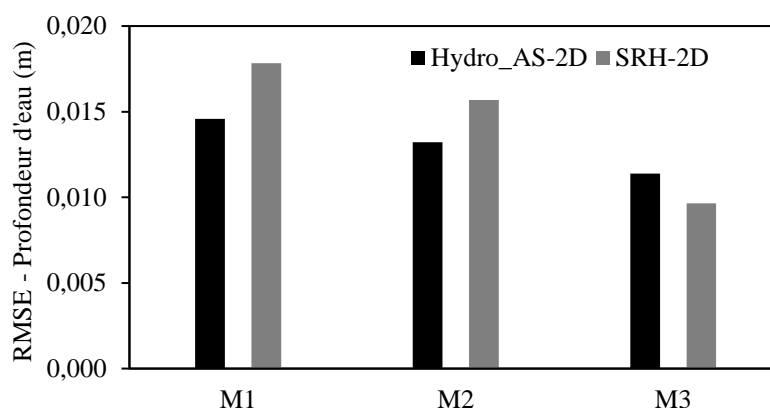


Figure 5.5. RMSE sur la profondeur d'eau avec un nombre de jauges restreint – Configuration 2

### 5.1.2 Vitesse

La présence d'un seuil dans le canal induit un écoulement fortement bidimensionnel, ce qui rend ce cas intéressant pour l'analyse des vitesses. Les vitesses expérimentales n'étant pas connues, il s'agit ici d'une comparaison du comportement général de HYDRO\_AS-2D et SRH-2D lors du calcul de ce paramètre.

La figure 5.6 présente les différences de vitesses calculées à tous les nœuds entre les deux modèles. Les données calculées aux noeuds situés directement sur une des frontières ( $y = 0$  m ou  $y = 0.762$  m) ne sont pas considérées pour ce calcul puisque SRH-2D y appose automatiquement une valeur de 0 m/s ce qui n'est pas le cas de HYDRO\_AS-2D. On constate ainsi que dans 32% des cas, HYDRO\_AS-2D calcule une vitesse plus élevée que SRH-2D. La différence la plus importante est de 1 m/s et est observée à  $x = 2.26$  m et  $y = 0.636$  m, ce qui correspond à la crête de la butée (voir figure 5.7).

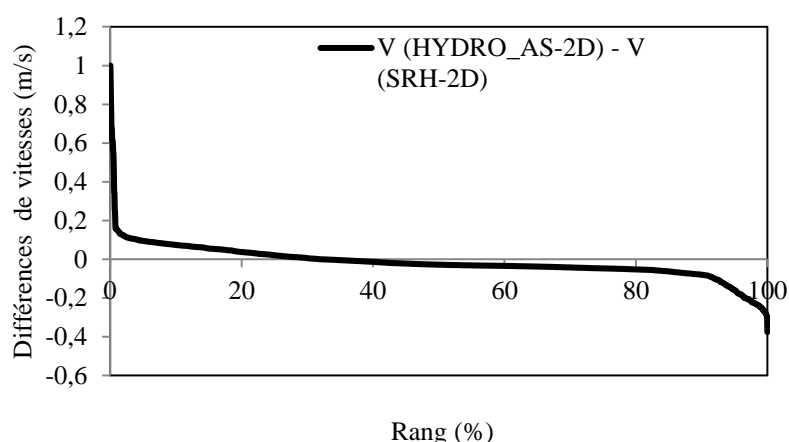


Figure 5.6. Différences des vitesses classées (Valeurs négatives si les vitesses de SRH-2D sont plus élevées)

Les champs de vecteurs de vitesses sont illustrés à la figure 5.7 pour une zone située directement autour du seuil et présentent des profils similaires pour HYDRO\_AS-2D et SRH-2D. Les vitesses les plus élevées sont observées immédiatement à l'aval de la crête du seuil et la vitesse la plus élevée est donnée par SRH-2D.



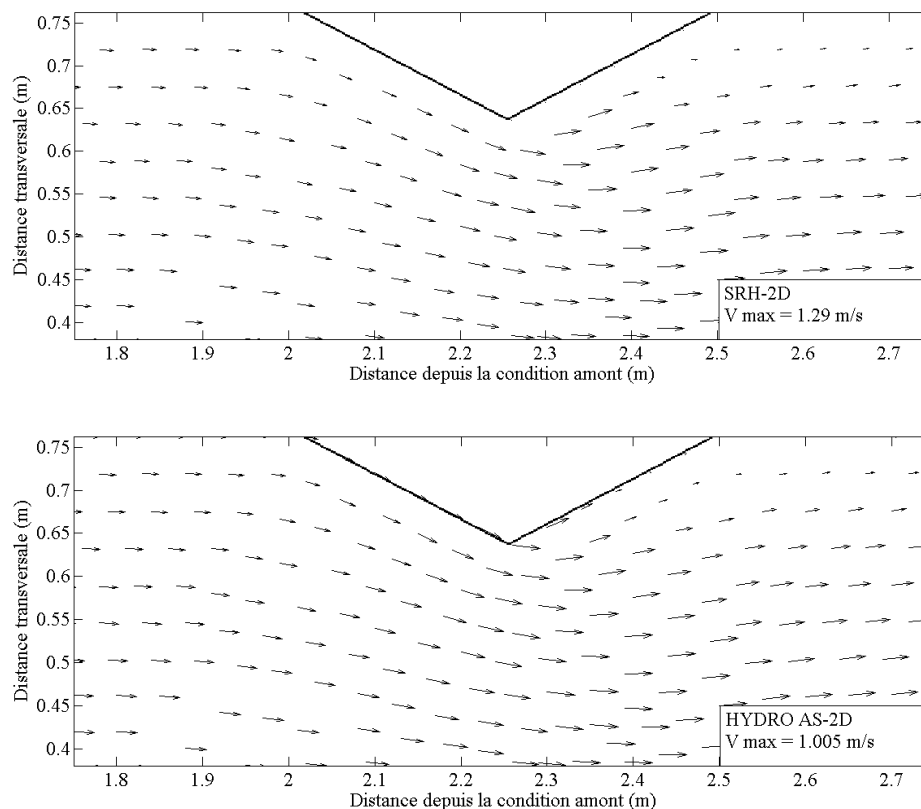


Figure 5.7 Vitesses autour du seuil triangulaire telles que calculées par SRH-2D (haut) et HYDRO\_AS-2D (bas)

### 5.1.3 Temps de calcul

Le temps de calcul de SRH-2D est grandement influencé par le pas de temps utilisé (figure 5.8) et augmente par exemple par un rapport de 64 pour le maillage 1 selon que le pas de temps utilisé soit de 0.1 s ou 0.001 s. Toutefois et tel que démontré à la figure 5.2, le pas de temps n'a pratiquement pas d'incidence sur la précision. La comparaison des temps de calcul des deux modèles (figure 5.9) se base donc sur le plus petit pas de temps (0.1 s) et démontre que SRH-2D est jusqu'à 31 fois plus rapide dans le cas du maillage le plus fin (M3).

Il faut cependant noter que HYDRO\_AS-2D calcule automatiquement les pas de temps utilisés et que ceux-ci sont toujours beaucoup plus petits que celui assurant la stabilité pour SRH-2D et qui est donc utilisé dans la comparaison (0.1 s). Par exemple, pour le maillage 1, le pas de temps utilisé par HYDRO\_AS-2D est de 0.0047 s pour un temps de calcul de 40 secondes alors que SRH-2D assure le calcul en 45 secondes avec un pas de temps deux fois plus élevé de 0.01 s. À

calcul identique, HYDRO\_AS-2D est donc plus rapide, mais SRH-2D a dans ce cas l'avantage de permettre l'analyse de sensibilité au pas de temps.

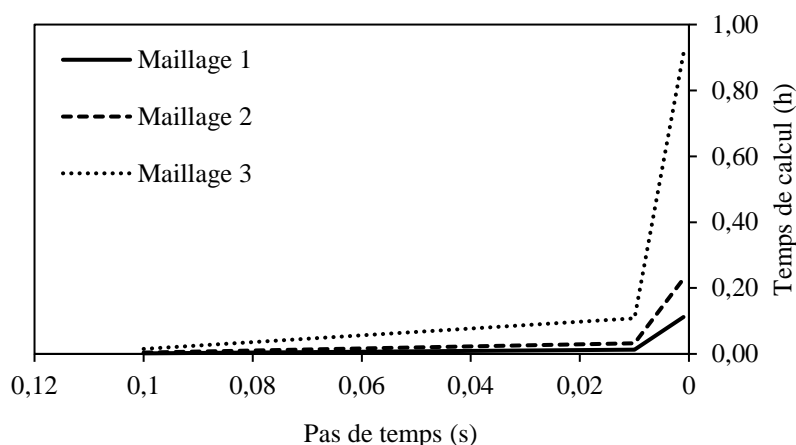


Figure 5.8. Temps de calcul en fonction du pas de temps de SRH-2D – Configuration 2<sup>1</sup>

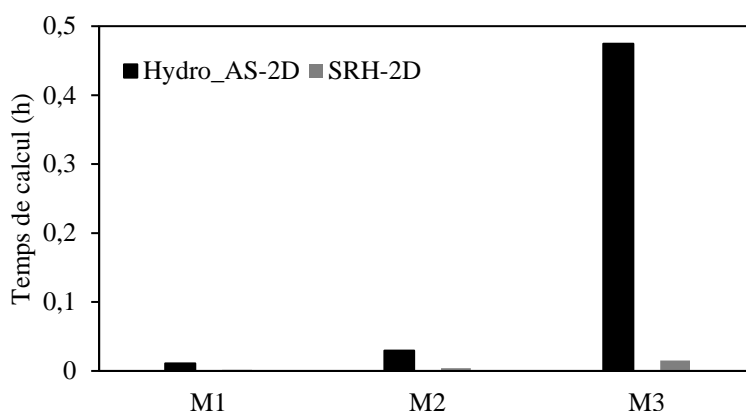


Figure 5.9. Comparaison des temps de calcul de SRH-2D et HYDRO\_AS-2D – Configuration 2<sup>1</sup>

Les trois courbes de la figure 5.8 semblent avoir des évolutions qui peuvent être approchées par des régressions du type puissance. La régression du type puissance s'exprime sous la forme 5.1 et est adaptée aux phénomènes dont l'augmentation se fait à un rythme constant, ce qui est probablement le cas puisque, pour chaque maillage, le pas de temps est constamment réduit par un facteur de 10, multipliant ainsi le nombre d'itérations nécessaires par le même facteur.

<sup>1</sup> Calculs réalisés sur un serveur de 64 GB muni d'un processeur Intel Xeon CPU E5-2630 v3 @2.40 GHz.

$$y = A \cdot x^B \quad 5.1$$

On observe que le coefficient de détermination est très élevé pour les trois maillages (table 5.1), ce qui semble indiquer qu'une régression de type puissance est applicable pour ce genre de phénomène.

Tableau 5.1. Paramètres de régression concernant les temps de calcul des trois maillages

Maillage	A	B	R <sup>2</sup>
M1	0.0002	-0.902	0.999
M2	0.0006	-0.873	0.9996
M3	0.0019	-0.889	0.9995

## 5.2 Configuration 3 – Canal avec butée triangulaire

### 5.2.1 Profondeur d'eau

Dans le cas du canal avec butée triangulaire, le raffinement du maillage semble légèrement dégrader les résultats de SRH-2D alors que la RMSE de la profondeur d'eau passe de 0.0047 m à 0.0055 m (figure 5.10), ce qui demeure malgré tout très faible. La variation du pas de temps semble n'avoir que très peu d'effet sur l'erreur avec une diminution de  $6.63 \times 10^{-5}$  m pour le maillage moyen ainsi qu'une augmentation de  $1.45 \times 10^{-5}$  m pour le maillage grossier et de  $2.56 \times 10^{-6}$  m pour le maillage fin. L'indépendance au maillage et au pas de temps est ainsi atteinte et le pas de temps de 0.1 s est considéré pour la suite de la comparaison.

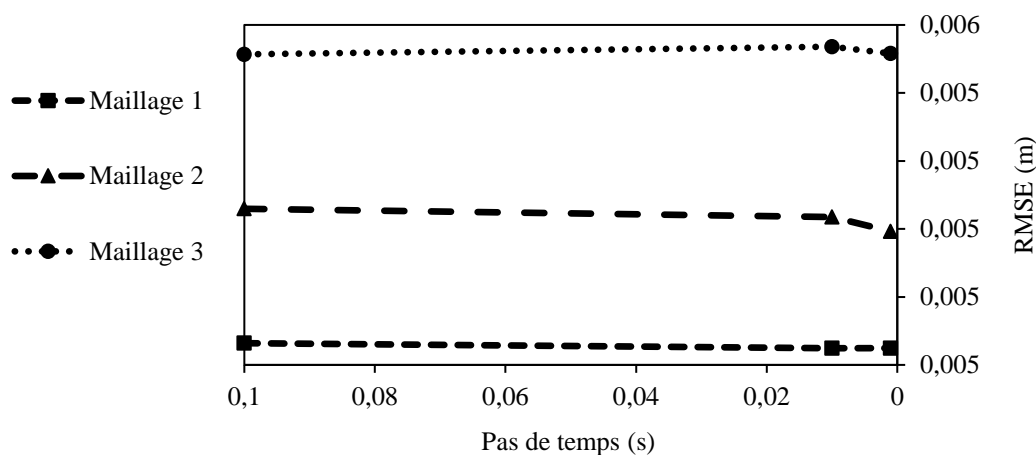


Figure 5.10. Analyse de sensibilité au pas de temps et au maillage pour SRH-2D – Configuration 3

Lors du raffinement du maillage, HYDRO\_AS-2D a un comportement similaire à ce qui a été observé dans la modélisation de la configuration 2, c'est-à-dire que la RMSE augmente de façon importante (facteur 1.9) avec le maillage plus fin (figure 5.11). Encore une fois, HYDRO\_AS-2D réagit mal à un raffinement trop intense du maillage.

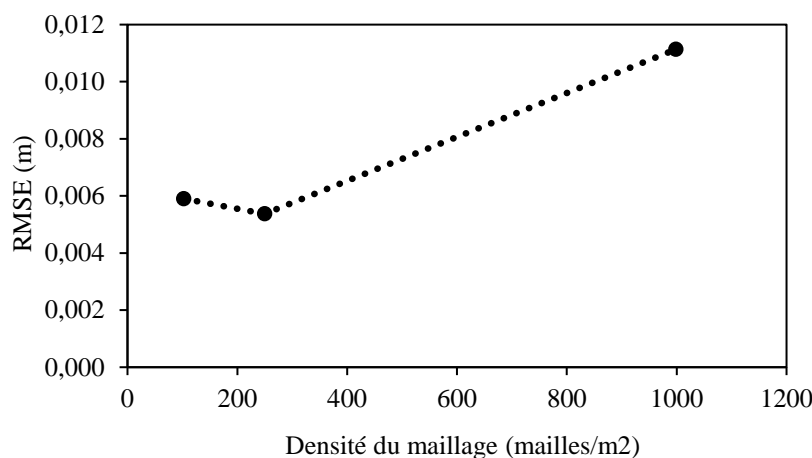


Figure 5.11. Analyse de sensibilité au maillage pour HYDRO\_AS-2D – Configuration 3

Les résultats de SRH-2D et HYDRO\_AS-2D sont très proches l'un de l'autre pour les maillages 1 et 2, mais sont nettement à l'avantage de SRH-2D pour le maillage fin (M3) qui présente une RMSE deux fois plus petite. Ces résultats s'observent à la figure 5.12 et s'expliquent par la dégradation des résultats notée précédemment chez HYDRO\_AS-2D (figure 5.11).

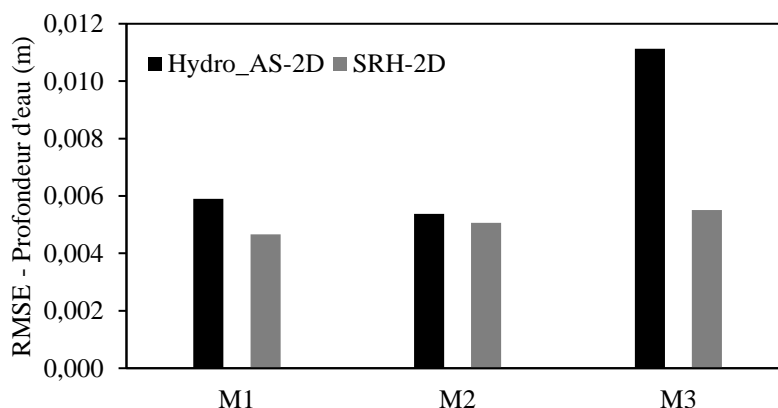


Figure 5.12. RMSE sur la profondeur d'eau – Configuration 3

On étudie maintenant l'évolution de l'erreur pour les seuls trois points situés directement à l'amont du seuil ( $x = 1.95$  m) où l'écoulement le plus complexe se produit. Par rapport au calcul

tenant compte de toutes les jauges, SRH-2D voit son erreur très légèrement réduite pour les trois maillages (figure 5.13). HYDRO\_AS-2D a une erreur similaire à l'exception du maillage intermédiaire où celle-ci est réduite par un rapport de 2.8. HYDRO\_AS-2D prend ainsi l'avantage pour le deuxième maillage mais reste moins précis pour les maillages plus fin et plus grossier (figure 5.13).

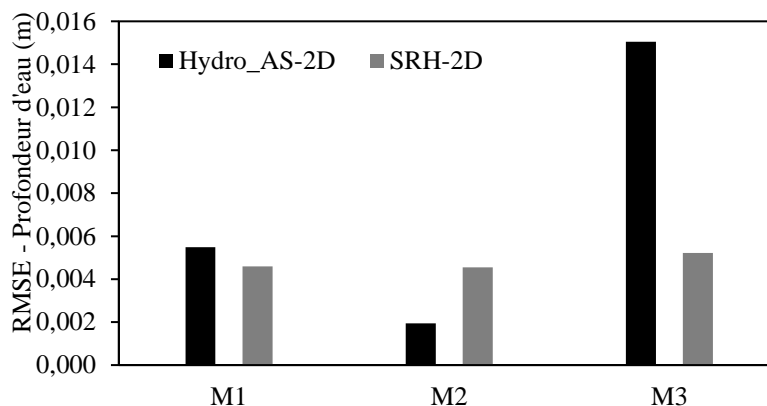


Figure 5.13. RMSE sur la profondeur d'eau avec nombre de jauges restreint – Configuration 3

## 5.2.2 Temps de calcul

Encore une fois, le temps de calcul est largement influencé par le choix du pas de temps avec un rapport entre les pas de temps de 0.1 s et 0.001 s allant jusqu'à 63 dans le cas du maillage le plus fin (M3) (figure 5.14). La comparaison du temps de calcul des deux modèles est cependant faite en utilisant le premier pas de temps pour SRH-2D puisque celui-ci permet déjà l'indépendance au pas de temps. SRH-2D est ainsi plus rapide que HYDRO\_AS-2D par un rapport de 2.92 avec le maillage grossier (M1), de 3.1 avec le maillage moyen (M2) et de 9.8 avec le maillage fin (M3) (figure 5.15).

L'avantage de vitesse de SRH-2D est encore dû au fait que le pas de temps permettant la stabilité est largement inférieur à celui déterminé automatiquement par HYDRO\_AS-2D. Le calcul sur le maillage 1 avec HYDRO\_AS-2D se fait en 16 secondes avec un pas de temps de 0.01 s alors que SRH-2D pour le même pas de temps réalise le calcul en 46 secondes.

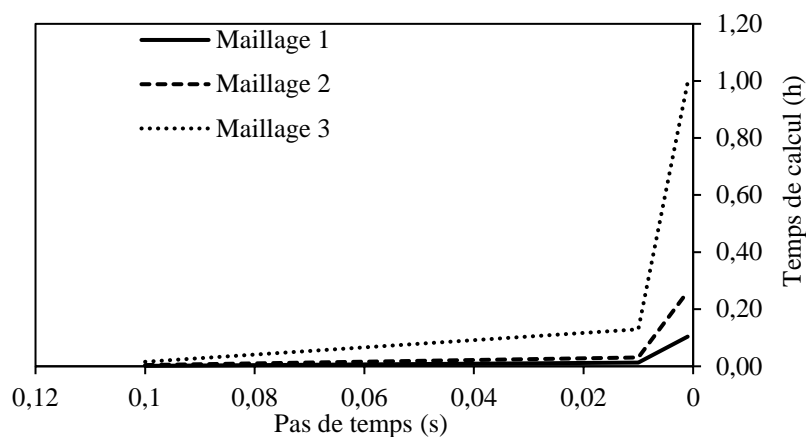


Figure 5.14. Temps de calcul de SRH-2D – Configuration 3<sup>2</sup>

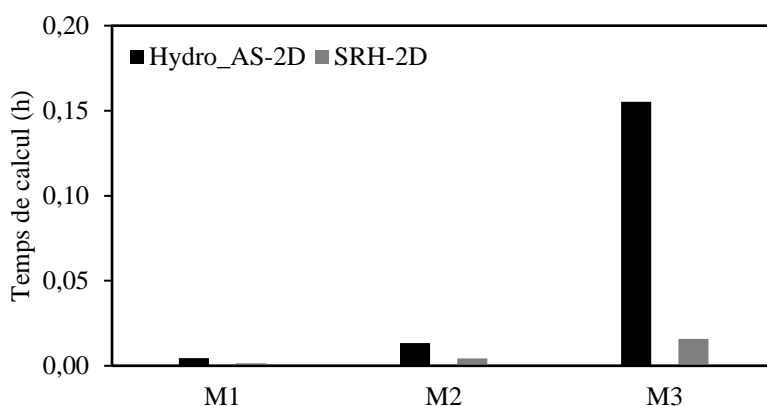


Figure 5.15. Comparaison des temps de calcul de SRH-2D et HYDRO\_AS-2D – Configuration 3<sup>2</sup>

### 5.3 Discussion

Une comparaison préliminaire des modèles SRH-2D et HYDRO\_AS-2D a été menée pour deux écoulements permanents et a permis de souligner quelques avantages et inconvénients de chaque modèle.

Aucun des deux modèles n'a pu se démarquer clairement en ce qui a trait à la précision des calculs. En effet, les modélisations menées sur le canal avec seuil (configuration 2) sont

---

<sup>2</sup> Voir note de bas de page 49

généralement à l'avantage de HYDRO\_AS-2D tandis que l'inverse est observé pour le canal avec butée triangulaire (configuration 3).

Les deux cas-tests considérés ont montré une dégradation des résultats de HYDRO\_AS-2D avec le maillage le plus fin, ce modèle réagissant moins bien que SRH-2D a un raffinement intense du maillage.

L'analyse de sensibilité sur le pas de temps avec SRH-2D montre que au-delà d'un certain point le raffinement du pas de temps n'affecte que très peu le modèle et mène même parfois à une légère dégradation des résultats.

Il a été impossible de faire la modélisation du canal avec butée (configuration 3) avec le module 2-steps de HYDRO\_AS-2D qui induit dans ce cas des instabilités numériques, le module 1-step a donc été utilisé. Étant donné que la discrétisation dans le temps du module 1-step est d'ordre 1, le nombre de calculs est grandement réduit, ce qui signifie peut-être que le nombre important de calculs réalisés par le module principal (2-steps) réagit mal aux petites dimensions du canal induisant ainsi des erreurs numériques. Cela viendrait corroborer l'hypothèse selon laquelle la dégradation des résultats avec un maillage trop fin (configurations 2 et 3) serait due à l'apparition d'erreurs numériques.

SRH-2D est plus rapide que HYDRO\_AS-2D dans les deux configurations modélisées et pour tous les maillages utilisés. Cette observation doit cependant être nuancée par le fait que les pas de temps utilisés avec SRH-2D et permettant la stabilité sont bien inférieurs à ceux calculés automatiquement par HYDRO\_AS-2D. À pas de temps égaux, HYDRO\_AS-2D se révèle être le modèle le plus rapide. La capacité de l'utilisateur de déterminer lui-même le pas de temps peut donc dans ce cas être un avantage de SRH-2D.

## CHAPITRE 6     ARTICLE 2 - COMPARISON OF TWO-DIMENSIONAL FLOOD PROPAGATION MODELS: SRH-2D AND HYDRO\_AS-2D

*Article soumis au Journal Natural Hazards en date du 17 août 2016*

*et accepté pour publication le 27 novembre 2016*

Basile Lavoie<sup>1</sup>, Tew-Fik Mahdi Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM), École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada. Email: basile.lavoie@polymtl.ca

<sup>2</sup> Professor, Département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM), École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada (Corresponding author). Email: [tewfik.mahdi@polymtl.ca](mailto:tewfik.mahdi@polymtl.ca). Phone: (514) 340-4711 Ext.: 5874. Fax: (514) 340-4191

### ABSTRACT

This article presents a comparison between two two-dimensional finite volume flood propagation models: SRH-2D and HYDRO\_AS-2D. The models are compared using an experimental dam-break test-case provided by Soares-Frazão (2007). Four progressively refined meshes are used, and both models react adequately to mesh and time step refinement. HYDRO\_AS-2D shows some unphysical oscillations with the finest mesh and a certain loss of accuracy. For that test-case, HYDRO\_AS-2D is more accurate for all meshes and generally faster than SRH-2D. HYDRO\_AS-2D reacts well to automatic calibration with PEST, whereas SRH-2D has some difficulties in retrieving the suggested Manning's roughness coefficient.

**AUTHOR KEYWORDS:** Model comparison; Two-dimensional flow modeling; HYDRO\_AS-2D; SRH-2D; Automatic calibration

### NOTATIONS

D     Hydraulic diameter  
e     Source term  
g     Gravitational acceleration



$h$	Water depth
$k$	Turbulent kinetic energy
$n$	Manning's roughness coefficient
$S_{fx}, S_{fy}$	Energy slope
$S_{bx}, S_{by}$	Bed slope
$T$	Turbulence stress
$u, v$	Velocity components
$z$	Water surface elevation
$z_b$	Bed elevation
$\mu$	Eddy viscosity
$\mu_0$	Kinematic viscosity of water
$\mu_t$	Turbulent eddy viscosity
$\rho$	Mass density
$\tau$	Shear stress

## 6.1 Introduction

Flood propagation may induce important human and material losses and remains a major challenge for hydraulic engineers due to the complexity of the phenomenon and therefore to the difficulties that arise in their numerical modeling. Two-dimensional models are now widely used in flood propagation modeling owing to the gain in precision they offer and their relatively small time consumption. Different types of methods were used for the numerical modeling of shallow water equations as finite differences, finite elements and finite volumes. For fluid flows, the last is currently accepted as the most accurate and has been implemented in several models such as TUFLOW-FV (BMTWBM 2014), RiverFlow2D (Hydronia 2015), SRH-2D (Lai 2008), HYDRO\_AS-2D (Nujic 2003), HEC-RAS (Brunner 2016) and BASEMENT (Vetsch 2015). If these models are usually validated by their designer, few model-to-model comparisons exist. It is yet of great importance for practicing engineers to have objective and precise comparisons on

which they can rely for the choice of a flood propagation model. The aim of this paper is to provide such a comparison for two models: HYDRO\_AS-2D, which is mainly used in European countries, and SRH-2D, largely used in North America.

SRH-2D was validated against numerous experimental, analytical and river cases. Lai (2008) and Lai (2010) showed that the model reacts correctly compared with the analytical solution of a transcritical flow with a hydraulic jump in a 1D channel that was proposed by MacDonald (1996). SRH-2D was also used to model the 2D diversion flow case measured by Shettar et Murthy (1996) with the conclusion that the flow was better modeled along the walls by SRH-2D with the k-epsilon turbulence model than with the parabolic model (Lai 2008; Lai 2010). Experimental data of a channel with bend proposed by Zarrati et al. (2005) were modeled with SRH-2D and showed that the computed water depth was less sensitive to mesh resolution than the velocity (Lai 2008; Lai 2010). The model was used to evaluate the impact of a dam removal on the Sandy River Delta with satisfactory results. A similar study was undertaken for the Savage Rapids dam removal and achieved good results in modeling the water depth and hydraulic jump (Lai 2008; Lai 2010).

Jones (2011) made a comparison of four two-dimensional hydrodynamic models: ADH (Berger et al. 2013), FESWMS (Froehlich 2002), RMA2 (Donnell 2006) and HYDRO\_AS-2D (Nujic 2003). Applied to three test-cases, HYDRO\_AS-2D proved to be the most stable and easy to use and was able to run in some cases where other models could not. HYDRO\_AS-2D was also the fastest model.

Tolossa (2008) and Tolossa et al. (2009) compared the two-dimensional hydrodynamic models HYDRO\_AS-2D and SRH-W, which was the first released version of SRH-2D. The models were compared on three river reaches and were able to appropriately recreate the water depth. The authors report that SRH-W seems more sensitive to mesh refinement, meaning that a finer mesh was needed to reach a precision comparable to HYDRO\_AS-2D. SRH-W was the fastest model of this study.

Both models have been tested in numerous studies and have been proven to be reliable. However, the previous comparisons and test-cases did not state which of SRH-2D and Hydro\_AS-2D could best predict the water depth. It is therefore the purpose of this paper to provide a clear statement on which model is best for forecasting flow parameters. The computation time will be compared

as well to confirm or nuance previous studies. In addition, a new feature, which has, to the best of our knowledge, never been used to compare hydrodynamic models, is studied for the purpose of this comparison: automatic calibration. Automatic calibration is becoming increasingly used in hydrodynamic and hydrologic modeling (Ellis et al. 2009; Fabio et al. 2010; McCloskey et al. 2011; McKibbin et Mahdi 2010) because it provides important gains not only in the calibration's necessary time but also in the calibrated parameters' values. Thus, it is important to ensure that models react correctly to an automatic calibration.

## 6.2 Presentation of Models

### 6.2.1 SRH-2D Version 3

SRH-2D solves the shallow water equations using the following form (Lai 2008; Lai 2010):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = e \quad 2.8$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial h v u}{\partial y} = \frac{\partial h T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad 2.9$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial h u v}{\partial x} + \frac{\partial h v v}{\partial y} = \frac{\partial h T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad 2.10$$

The friction is determined using the Manning equation:

$$\begin{pmatrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{pmatrix} = \rho C_f \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \sqrt{u^2 + v^2} \quad C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad 2.11-2.12$$

Boussinesq equations are used to compute the turbulence stresses:

$$T_{xx} = 2(\mu_0 + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}k \quad 2.13$$

$$T_{xy} = (\mu_0 + \mu_t) \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad 2.14$$

$$T_{yy} = 2(\mu_0 + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \quad 2.15$$

where  $h$  is the water depth,  $u$  and  $v$  are the velocity components,  $z$  is the water surface elevation,  $e$  is a source term,  $T$  are the turbulent stresses,  $\tau$  is the shear stress,  $g$  is the gravitational acceleration,  $\rho$  is the mass density,  $\mu_0$  is the kinematic viscosity of water,  $\mu_t$  is the turbulent eddy viscosity,  $k$  is the turbulent kinetic energy, and  $n$  is Manning's roughness coefficient.

SRH-2D proposes two turbulence models: k-epsilon and depth-averaged parabolic models. The parabolic model is used in the present study because it is the only turbulence model used by HYDRO\_AS-2D, and a proper comparison necessitates identical parameters. SRH-2D uses a wetting–drying front limit of 0.001 m. Below this value, water depth is considered to be equal to 0 m on the cell, and SRH-2D does not solve the shallow water equations (Lai 2010).

## 6.2.2 HYDRO\_AS-2D Version 4

Shallow water equations, as solved by HYDRO\_AS-2D, are expressed in vectors (Nujic 2003):

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial y} + \mathbf{G} = 0 \quad 2.16$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} z \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + 0.5gh^2 + \mu h \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - \mu h \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} vh \\ uvh - \mu h \frac{\partial u}{\partial y} \\ v^2h + 0.5gh^2 + \mu h \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{by}) \end{bmatrix}$$

The bed slope is defined as follows:

$$S_{bx} = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad S_{by} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad 2.17$$

The energy slope is computed following the Darcy–Weisbach equation, and the friction coefficient is determined with the Manning formula:

$$S_f = \left( 6.34 \frac{2gn^2}{D^{1/3}} \right) \cdot \left( \frac{v|v|}{2gD} \right) \quad 2.18$$

where  $\mu$  represents the eddy viscosity,  $S_f$  is the energy slope,  $z_b$  is the bed elevation, and  $D$  is the hydraulic diameter.

The default wetting–drying front limit is set to 0.01 m but is lowered to 0.001 m for the current study. Time steps are calculated automatically and continuously by HYDRO\_AS-2D over the modeling.

### 6.3 SMS Version 12.1

The Surface–water Modeling System, SMS (AQUAVEO 2016), facilitates the required pretreatment and post-treatment for hydraulic modeling of open channel flow. SMS includes many characteristics of GIS software and uses them, for example, in the creation of quality meshes. The results may be viewed in three dimensions, and many tools are available for their treatment, which makes SMS very versatile and usable with multiple models (AQUAVEO 2016). For the present study, SMS allows with great ease the use of the same mesh and boundary conditions for the two models, SRH-2D and HYDRO\_AS-2D, which is necessary for a proper comparison.

### 6.4 PEST Version 13

PEST (Doherty 2005) is a software program that executes the automatic calibration and sensibility analysis of any model based on input and output files. In this study, only the automatic calibration module is used. Automatic calibration with PEST requires three main types of files: template, instruction and control files (figure 2.1).

- Template files act as models for PEST when creating input files to calibrate the model (i.e., SRH-2D and HYDRO\_AS-2D).

- Instruction files aid PEST in the interpretation of the model's output by indicating the values that should be used for the calibration.
- The control file contains calibration instructions, such as stopping criteria and observed values. It relates the template and instruction files to the model's files to which they refer.

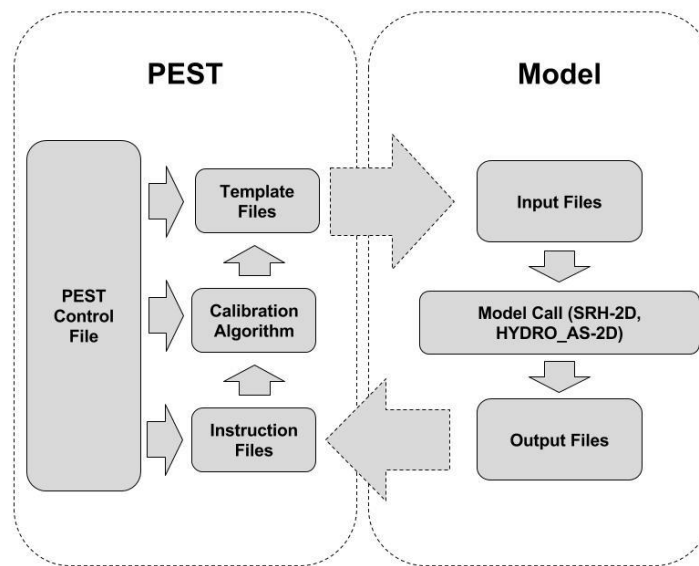


Figure 2.1. Automatic calibration with PEST – Adapted from Lin (2010)

PEST is therefore model independent and relatively simple to use, which makes it a powerful tool for the calibration of two-dimensional hydrodynamic models.

## 6.5 Methodology

The comparison of SRH-2D and HYDRO\_AS-2D is made on experimental data and aims to verify the accuracy of both models, their sensitivity to spatial and time discretization, and their response to automatic calibration.

### 6.5.1 Test-case

The two models are compared using an experimental dataset presented by Soares-Frazão (2007) in which a dam break wave over a triangular bottom sill is studied. The rectangular channel has a width of 0.5 m and a length of 5.6 m, and the sill height is 0.065 m with a symmetrical slope of

approximately 14% (figure 6.1). The suggested Manning's roughness coefficient is  $0.011 \text{ s/m}^{1/3}$ . The initial conditions (figure 6.1) are made of an upstream reservoir in which the water depth is 0.111 m and by a downstream pool, isolated from the rest of the channel by the sill, with a water depth of 0.02 m. The central section is initially dry. The reservoir is isolated by a gate whose sudden removal creates the propagation of the dam-break wave upon the channel.

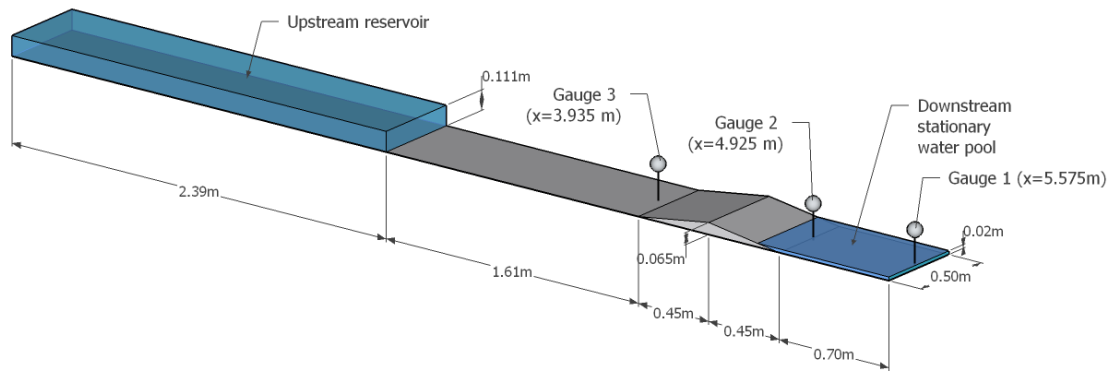


Figure 6.1. Channel geometry, initial conditions and gauges positions

All four boundaries of the channel consist of walls, meaning that the wave will successively reflect against the downstream and upstream walls. The wave first propagates on the dry bed to reach the sill where the water is partly reflected to the upstream part of the channel and partly continues to reach the water pool located downstream of the sill. Reflections are then simultaneously observed in the sections of the channel located on both sides of the sill.

Three gauges are positioned around the triangular sill to monitor the incidence of this feature on the flow. The monitoring lasts 45 s, during which the water depths are available every 0.01 s, for a total of 4501 measurements for each gauge.

### 6.5.2 Time Step and Mesh Sensitivity and Water Depth Accuracy

The simulation is made with SRH-2D on four progressively refined meshes (figure 6.2) that are all modeled with five time steps (table 6.1 and table 6.2). These twenty simulations are then used to investigate the sensitivity of SRH-2D to these parameters and will ensure that a mesh- and

time-step-independent solution is achieved. The time step providing the best results is afterward used for the comparison with HYDRO\_AS-2D. HYDRO\_AS-2D computes the time step required to fulfill the Courant condition, so the user does not have influence on that parameter. Therefore, only the mesh sensitivity is evaluated for this model. The meshes used are the same as those presented above for SRH-2D.

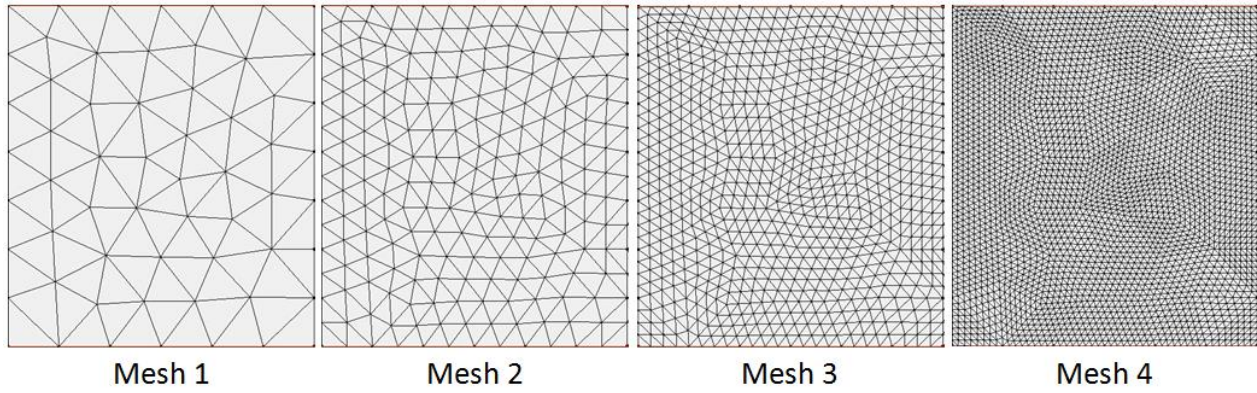


Figure 6.2. Meshes in a  $0.5 \text{ m} \times 0.45 \text{ m}$  zone

Table 6.1. Time steps

ID	Time Step (s)
1	0.02
2	0.015
3	0.005
4	0.0004
5	0.0001

Table 6.2. Meshes

ID	Number of cells
1	1353
2	5412
3	21 648
4	86 592



The comparison is then made on the four meshes, and the quality of the simulations is quantified through the calculation of the root mean squared error (RMSE) considering the calculated and measured water depth every 0.1 s for a total of 450 benchmark measurements by gauge.

All simulations last 45 s, and the depth-averaged parabolic model is used for turbulence for both SRH-2D and HYDRO\_AS-2D. The minimum water depth for the treatment of the wetting and drying front is 0.001 m, and the maximum velocity is 15 m/s for HYDRO\_AS-2D. The wetting and drying front limit is also 0.001 m for SRH-2D, but the maximum velocity is unknown. All wall boundaries are assigned a no-slip condition. All calculations are made with a 64 GB server with an Intel Xeon CPU E5-2630 v3 @2.40 GHz processor.

### **6.5.3 Response to Automatic Calibration**

The dam-break models, using SRH-2D and HYDRO\_AS-2D, are automatically calibrated with PEST to verify whether they can properly retrieve the Manning's roughness coefficient suggested by Soares-Frazão (2007) and the incidence of that calibration on the water depth RMSE.

The automatic calibration requires experimental measurements to compare the simulations and choose the best Manning's coefficient. Because the calibration time increases proportionally to the number of measurements, all available measurements cannot be used. The number of benchmark values is therefore set to 27, meaning one measurement at each gauge every 5 s. The coarsest mesh is used for the calibration, and Manning's roughness coefficient is allowed to vary between  $0.005 \text{ s/m}^{1/3}$  and  $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$  for both SRH-2D and HYDRO\_AS-2D.

## **6.6 Results and Discussion**

### **6.6.1 Time Step and Mesh Sensitivity—SRH-2D**

Figure 6.3 presents the evolution of RMSE relative to time step refinement for each gauge and each mesh and shows a quick stabilization of the RMSE for the coarsest mesh, whereas the finest mesh has a drastic reduction of its error between the first and fourth time steps (ex: from 0.0182 m to 0.0092 m for gauge 3). The error is insignificantly modified between the fourth and fifth time steps (from 0.0092 m to 0.0087 m for gauge 3); these solutions can then be considered to have reached time step independence.

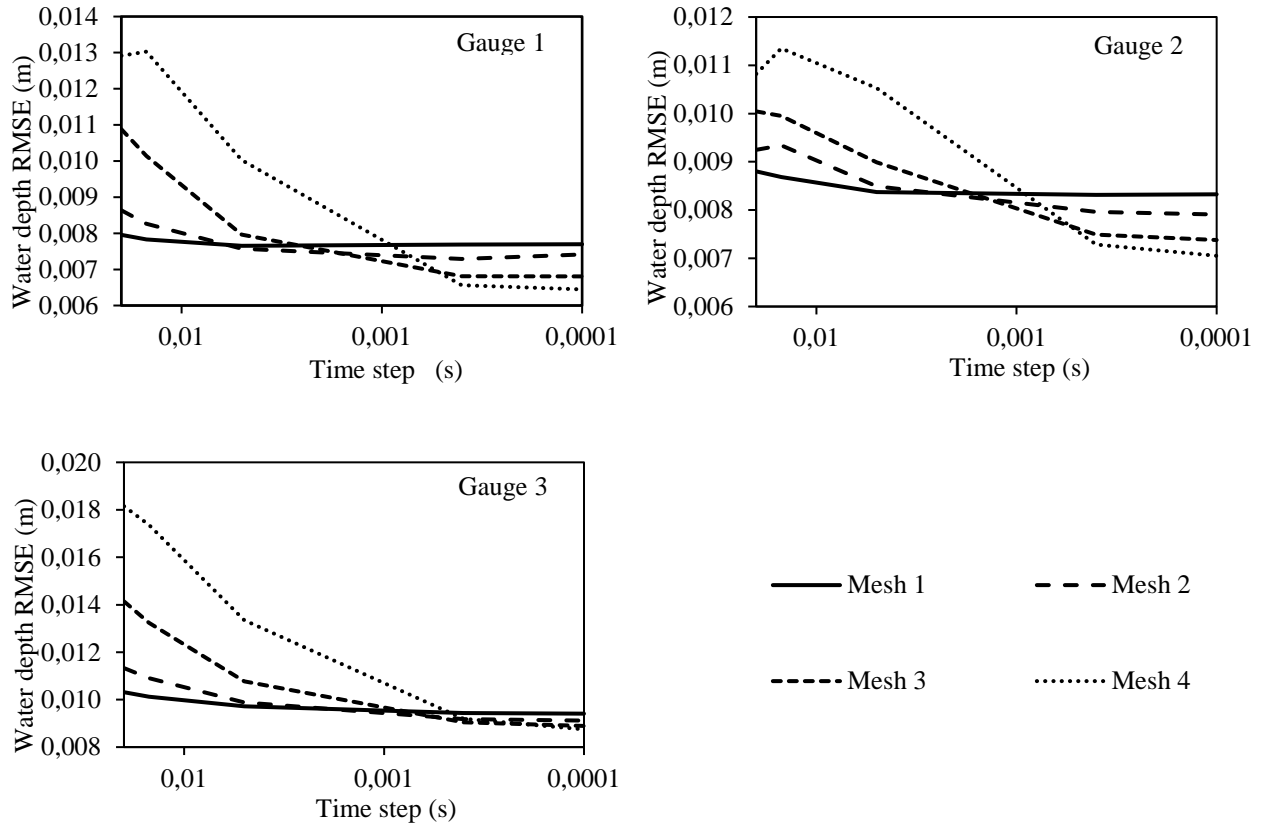


Figure 6.3. Water depth RMSE relative to time step refinement at Gauges 1, 2 and 3- SRH-2D

The fifth time step gives the best solution for all meshes. It is used to compute the evolution of water depth RMSE relative to mesh refinement, which can be observed in figure 6.4, and diminishes with the mesh density (from 0.0094 m to 0.0087 m for gauge 3).

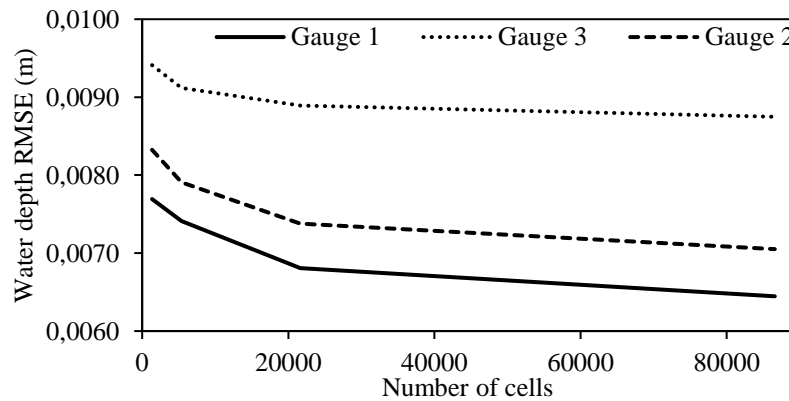


Figure 6.4. Water depth RMSE relative to mesh refinement – SRH-2D

These results conform to theory because the time step needed to ensure stability, and convergence is reduced proportionally to the grid size. SRH-2D has a good response to time step and mesh density refinement.

### 6.6.2 Mesh Sensitivity—HYDRO\_AS-2D

HYDRO\_AS-2D continuously adjusts the time step during the simulation to ensure numerical stability. Therefore, only the mesh sensitivity is addressed. Figure 6.5 shows a global reduction of RMSE following the mesh refinement with the exception of gauges 1 and 3, which present a slight increase for the fourth mesh (0.0004 m for gauge 1 and 0.0001 m for gauge 3). Similar results were published by (Družeta et al. 2009) and Boz et al. (2014), who investigated the influence of mesh density on the resolution of shallow water equations with the Q-scheme and the MUSCL–Hancock scheme, respectively, and on the resolution of the Navier–Stokes equations with the CFD code ANSYS CFX.

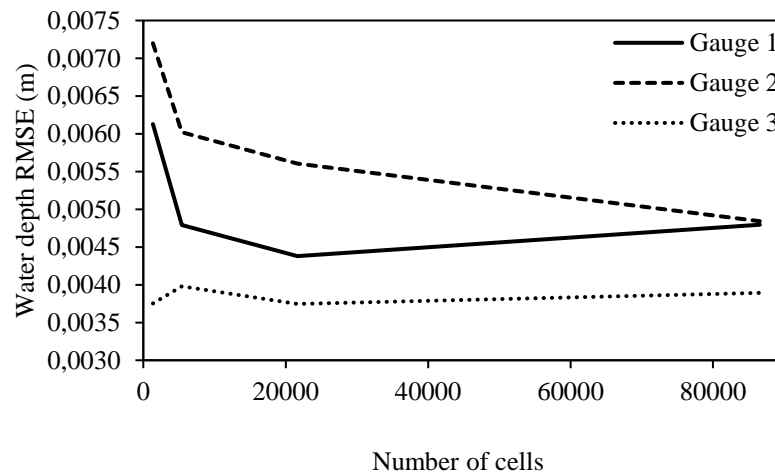


Figure 6.5. Water depth RMSE relative to mesh refinement – HYDRO\_AS-2D

### 6.6.3 Water Depth Profiles and Oscillations

Figure 6.6 shows the evolution of water depth in time for all meshes at gauge 1 as calculated by HYDRO\_AS-2D. The mesh refinement greatly benefits the results for the first 15 s of the simulation where the experimental and computed water depths become very similar. However, the refinement seems to increase the oscillation amplitude beyond the 15<sup>th</sup> second. These

oscillations are not physically representative when compared to the experimental line. This phenomenon may also be noted at a smaller scale for gauge 2 but is absent at gauge 3, which may be because these oscillations are induced by the wall reflection. This phenomenon was also noted by Družeta et al. (2009), who observed that the oscillation amplitude was increasing with increasing mesh refinement but observed no dependence between the oscillation frequency and the mesh density, which is not the case of the current study in which lower spatial resolution seems to yield a higher oscillation frequency (figure 6.6).

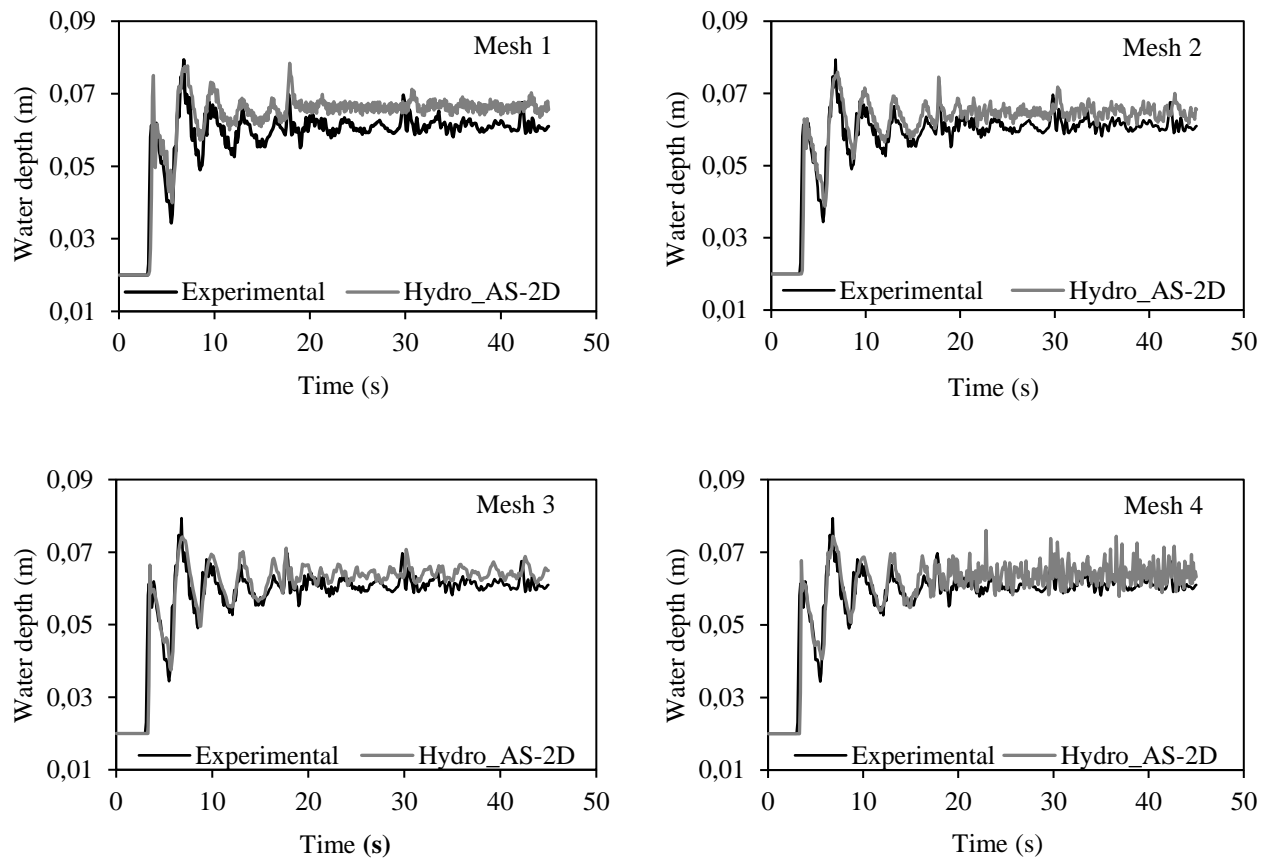


Figure 6.6. Water depth at gauge 1 for meshes 1, 2, 3 and 4– HYDRO\_AS-2D

SRH-2D has its general water depth results greatly improved by the mesh refinement, whereas the experimental and computed depths become closer (figure 6.7). The augmented spatial resolution also gives a better representation of the oscillations. Moreover, these oscillations are offset in time but stay physically consistent with the experimental data unlike HYDRO\_AS-2D.

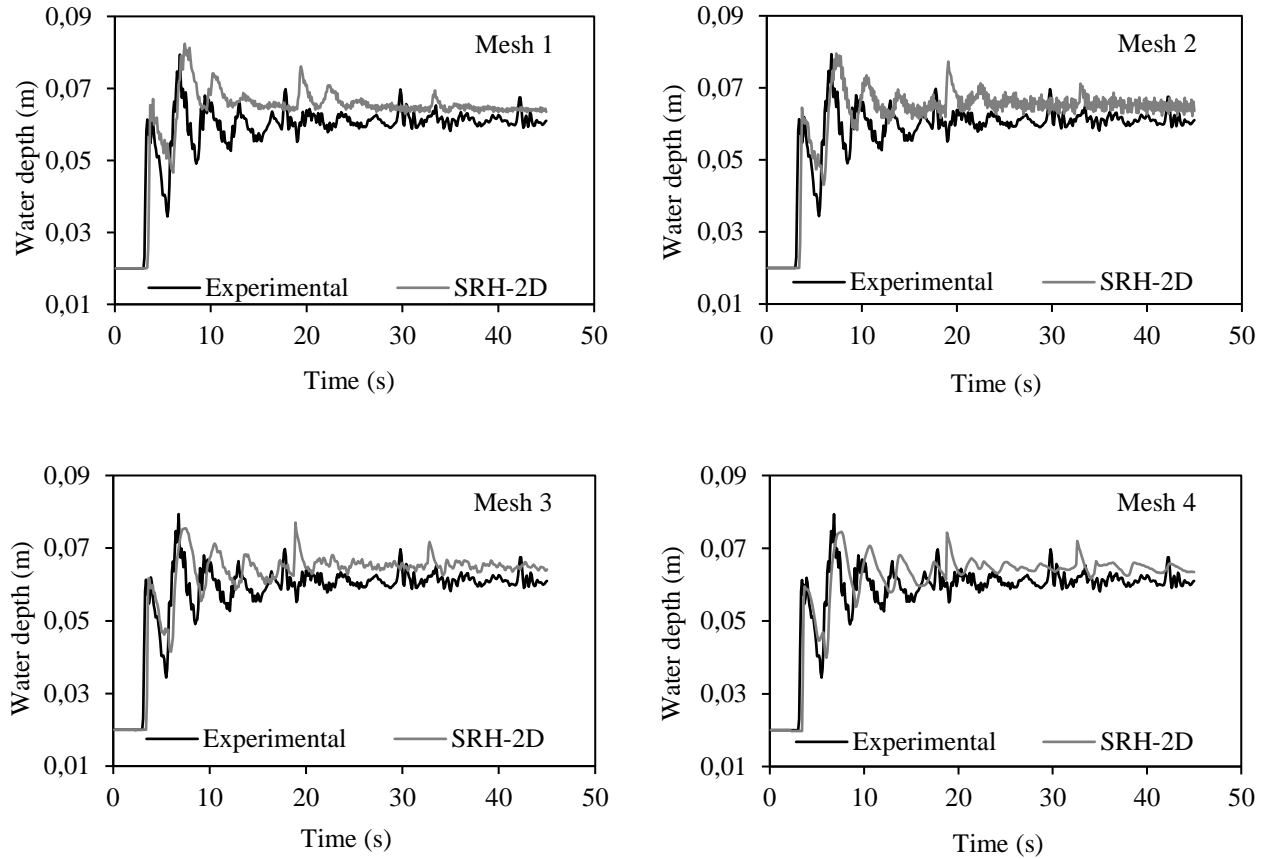


Figure 6.7. Water depth at gauge 1 for meshes 1, 2,3 and 4– SRH-2D

Comparing figure 6.6 and figure 6.7, HYDRO\_AS-2D seems to provide a better fit with the experimental data for all meshes, especially for the first 15 s.

#### 6.6.4 Water Depth RMSE

Figure 6.8 shows a comparison of computed water depth RMSEs for SRH-2D and HYDRO\_AS-2D with all four meshes. The smallest time step is used for all SRH-2D simulations because it provides the best results. For all meshes, HYDRO\_AS-2D is more accurate at all gauges and all meshes, and the most important difference between the two models' RMSE is observed at the third gauge (0.0094 m for SRH-2D versus 0.0038 m for HYDRO\_AS-2D with the coarsest mesh). SRH-2D has its largest error at gauge 3, which is initially dry and may represent the difficulty of modeling the wave propagation on a dry bed. This was noted as a current difficulty in numerical modeling by Soares-Frazão (2007) and was one of the main purposes of the experiment used in the current study. HYDRO\_AS-2D shows the most important error at gauge

2, which is placed after the downstream side of the sill. This may be because the important slope of the sill creates a flow that is not fully 2D and is therefore more difficult to represent by the model.

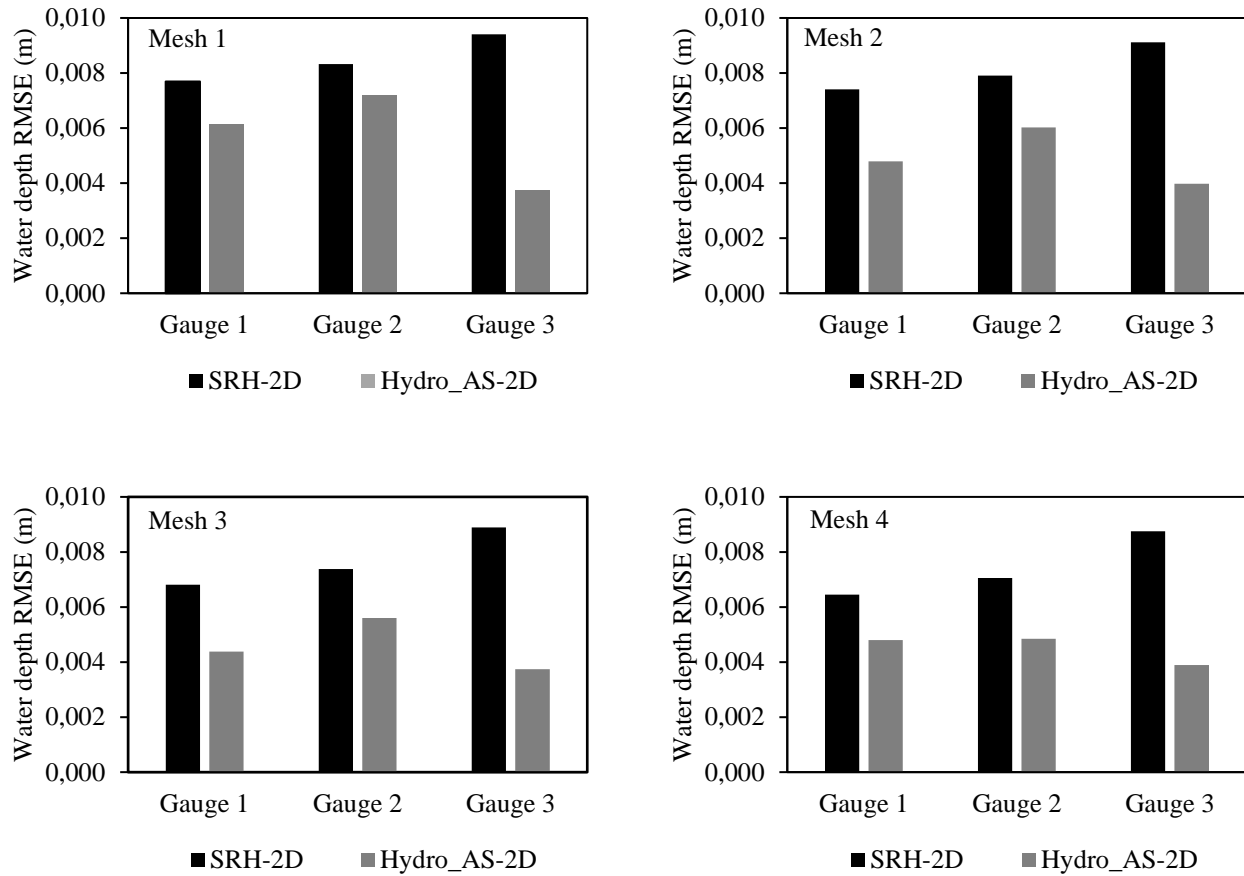


Figure 6.8. Comparison of computed water depth RMSEs – Meshes 1, 2, 3 and 4

### 6.6.5 Computation time

Computation time is highly related to the number of mesh elements and time steps. Only mesh density influence is studied for HYDRO\_AS-2D because the model automatically adjusts the time step. SRH-2D gives full control of these two parameters, so both mesh density and time step sensitivity are considered.

Figure 6.9 shows the evolution of computation time relative to the time step of all meshes for SRH-2D. The computation time increases with increasing mesh and time step resolutions. There

is a dramatic increase in the computational time for time step 5 (0.0001 s) compared with time step 4 (0.0004 s), especially for the finest mesh (11.6 h versus 39.1 h).

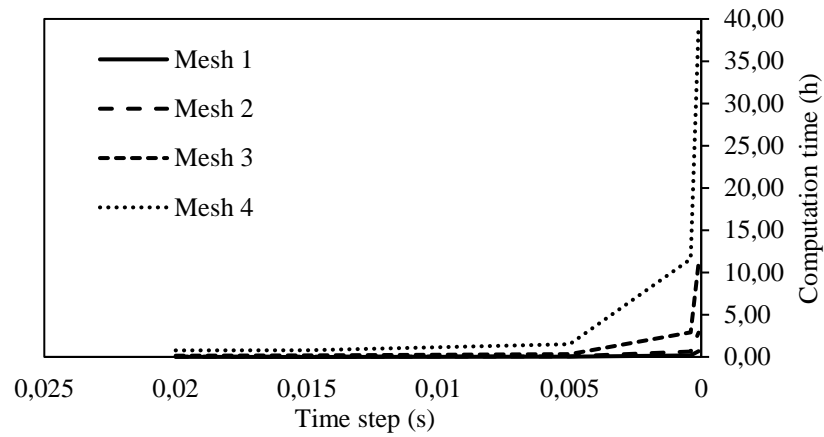


Figure 6.9. Computation time relative to time step refinement – SRH-2D

Because the time step has such a drastic influence on the computation time, this parameter must be properly chosen to form a reliable comparison and avoid the use of a very small time step that would unnecessarily increase the computation time. Therefore, the chosen time step for SRH-2D is the one allowing time step independence of the model and is selected based on the results of figure 6.3 (section Time Step and Mesh Sensitivity). Table 6.3 summarizes the time step used for the two models in the computation time comparison. The computation times are pretty much equal for the first mesh, but HYDRO\_AS-2D is generally faster by an average factor of 7.51 h/h (figure 6.10). One should note that the largest difference is observed for the finest mesh where HYDRO\_AS-2D is 15.8 times faster, whereas the time step is almost the same for both models ( $\Delta t_{\text{SRH-2D}} = 0.0004$  s and  $\Delta t_{\text{HYDRO\_AS-2D}} = 0.00037$  s). The capacity of HYDRO\_AS-2D to parallelize the calculation can explain this difference between the two models. The code structures may also impact the computation time, but this information is not available for these models.

Table 6.3. Time steps used for computation time comparison

	SRH-2D (s)	HYDRO_AS-2D (s)
Mesh 1	0.005	0.020691
Mesh 2	0.005	0.001282
Mesh 3	0.0004	0.001675
Mesh 4	0.0004	0.000369

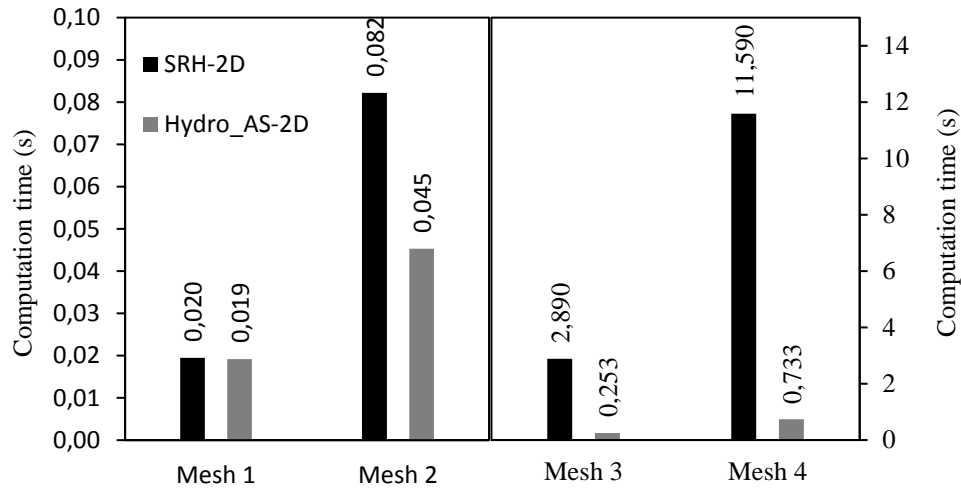


Figure 6.10. Comparison of computation time

### 6.6.6 Response to Calibration

Table 6.4 summarizes the results and parameters of the automatic calibrations with PEST for the two models. SRH-2D necessitates 10 iterations and 38 model calls, whereas HYDRO\_AS-2D completes the calibration in 3 iterations and 19 model calls. SRH-2D is slightly faster (1.08 h versus 1.2 h), which is not surprising considering that this model has been shown to be faster for the coarsest mesh, the only mesh used for the automatic calibration, when used with a time step of 0.005 s (see section *Computation Time*).

Table 6.4. Calibration parameters and results

	SRH-2D		HYDRO_AS-2D	
	Calibrated n	Suggested n	Calibrated n	Suggested n
RMSE Gauge 1 (m)	0.00821	0.00765	0.00640	0.00613
RMSE Gauge 2 (m)	0.00518	0.00837	0.00739	0.00720
RMSE Gauge 3 (m)	0.00754	0.00972	0.00403	0.00375
Model calls	38		19	
Iterations	10		3	
Calibrated n ( $\text{s/m}^{1/3}$ )	0.0219		0.0096	
Suggested n ( $\text{s/m}^{1/3}$ )	0.011		0.011	
Computation time (h)	1.08		1.2	



Automatic calibration with HYDRO\_AS-2D provides Manning's roughness coefficient of  $0.0096 \text{ s/m}^{1/3}$ , which is very similar to  $0.011 \text{ s/m}^{1/3}$  as suggested by Soares-Frazão (2007). SRH-2D, when calibrated, gives a very different value of  $0.0219 \text{ s/m}^{1/3}$ . HYDRO\_AS-2D provides very similar RMSEs with calibrated and suggested Manning's roughness coefficients; the maximal difference is  $0.0003 \text{ m}$ , which is observed at gauge 3. This is consistent with the fact that the calibrated Manning's coefficient is very close to the suggested coefficient. Therefore, Hydro\_AS-2D has a good response to automatic calibration. When calibrated, SRH-2D shows a greater improvement of its RMSE, which decreases by up to  $0.0032 \text{ m}$  at gauge 2. If only the water depth RMSE is considered to qualify the automatic calibration, SRH-2D seems to be benefiting from a Manning's roughness coefficient that is approximatively twice the suggested coefficient. This is unlikely because that parameter would lose its physical representativeness of the actual channel's roughness. This is confirmed by the observation of the evolution of water depth in time at gauge 1 (figure 6.11). The calibrated computed water depth becomes closer to the experimental water depth in the second half of the experiment; however, it is clear that the shape of oscillation is lost with the calibration and is better represented by the original suggested Manning's coefficient. Despite the reduced water depth RMSE, the automatic calibration is unsuitable for SRH-2D in that case. One can note that Hydro\_AS-2D remains generally more accurate than SRH-2D, the only exception being gauge 2 at which SRH-2D gives a smaller RMSE.

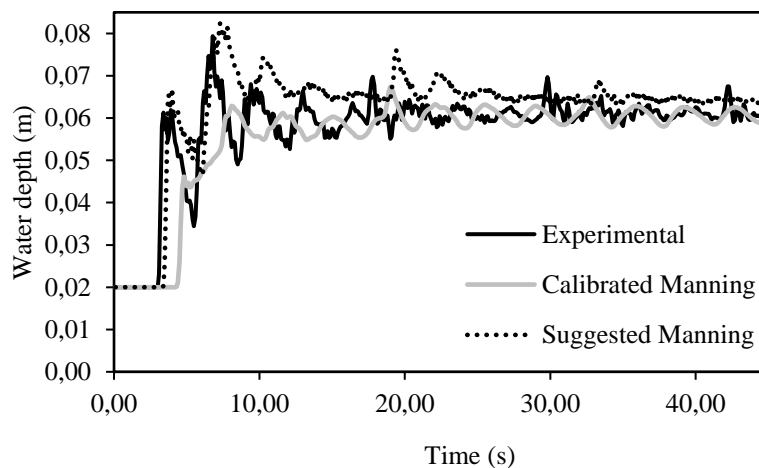


Figure 6.11. Comparison of water depth with suggested and calibrated Manning's coefficient at gauge 1 – SRH-2D

## 6.7 Conclusion

Two flood propagation models, HYDRO\_AS-2D and SRH-2D, were compared in terms of their capacity to properly model an experimental dam-break test case. The two models were shown to have a good response to mesh and time step refinement; however, HYDRO\_AS-2D showed unphysical oscillations and an increase in the water depth RMSE at two of the three gauges with the finest mesh. These observations support the idea that too much spatial resolution could negatively affect the accuracy of a model as noted by Družeta et al. (2009) and Boz et al. (2014). HYDRO\_AS-2D computed lower RMSEs for all meshes and was therefore more accurate than SRH-2D. HYDRO\_AS-2D was up to 15.8 times faster than SRH-2D. This contrasts with the results of Tolossa (2008) and Tolossa et al. (2009), who found that SRH-W (the previous version of SRH-2D) was faster than HYDRO\_AS-2D. HYDRO\_AS-2D responded well to the automatic calibration of Manning's roughness coefficient by computing a coefficient very similar to the suggested one, whereas SRH-2D computed a very different coefficient that lowered the water depth RMSE but with no physical representativeness of the actual channel.

This research has exposed some of the differences between two major hydrodynamic models and clarified their respective assets to offer an objective point of comparison that will be helpful for industrial and research engineers in choosing a modeling tool for flood propagation.

## 6.8 Acknowledgments

This research was supported in part by a National Science and Engineering Research Council (NSERC) Discovery Grant, application No: RGPIN-2016-06413.

## 6.9 References

1. AQUAVEO (2016). "SMS 12.1 - The Complete Surface-water Solution." <<http://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction>>. (March 10, 2016).
2. Berger, R. C., Tate, J. N., Brown, G. L., and Savant, G. (2013). "Adaptive Hydraulics Users Manual." Coastal and Hydraulics Laboratory Engineer Research and Development Center, 99.
3. BMTWBM (2014). "TUFLOW FV User Manual." *Flexible Mesh Modelling*, BMT WBM, Brisbane, Australia, 183.

4. Boz, Z., Erdogan, F., and Tutar, M. (2014). "Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating." *Journal of Food Engineering*, 8-16.
5. Brunner, G. W. (2016). "HEC-RAS River Analysis System User's Manual." US Army Corps of Engineers, Davis, CA, USA, 960.
6. Doherty (2005). "PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition." Watermark Numerical Computing.
7. Donnell, B. P. (2006). "RMA2 WES Version 4.5." I. King, J. V. Letter, W. H. McAnally, and W. A. Thomas, eds., US Army, Engineer Research and Development Center, 277.
8. Družeta, S., Sopta, L., Maćešić, S., and Črnjarić-Žic, N. (2009). "Investigation of the Importance of Spatial Resolution for Two-Dimensional Shallow-Water Model Accuracy." *Journal of Hydraulic Engineering*, 917-925.
9. Ellis, R. J. I., Doherty, J., Searle, R. D., and Moodie, K. (2009). "Applying PEST (Parameter ESTimation) to improve parameter estimation and uncertainty analysis in WaterCAST models." *18th World IMACS/MODSIM Congress, Modelling and Simulation Society of Australia and New-Zealand Inc.*, 3158-3164.
10. Fabio, P., Aronica, G. T., and Apel, H. (2010). "Towards automatic calibration of 2-D flood propagation models." *Hydrology and Earth System Sciences*, 10.5194/hess-14-911-2010, 911-924.
11. Froehlich, D. C. (2002). "User's Manual for FESWMS FST2DH." Federal Highway Administration, 209.
12. Hydronia (2015). "RiverFlow2D Plus Two-Dimensional Finite-Volume River Dynamics Model." Hydronia, Pembroke Pines, FL, USA, 157.
13. Jones, D. A. (2011). "The Transition from Earlier Hydrodynamic Models to Current Generation Models." Master of Science, Brigham Young University, Brigham.
14. Lai, Y. G. (2008). "SRH-2D version 2: Theory and User's Manual." U.S. Department of the interior - Bureau of Reclamation, Denver.
15. Lai, Y. G. (2010). "Two-Dimensional Depth-Averaged Flow Modeling with an Unstructured Hybrid Mesh." *Journal of Hydraulic Engineering*, 12-23.
16. Lin, Z. (2010). "Getting Started with PEST." The University of Georgia, Athens, GA.
17. MacDonald, I. (1996). "Analysis and Computation of Steady Open Channel Flow." Doctor of Philosophy, University of Reading, Reading, UK.
18. McCloskey, G. L., Ellis, R.J., Waters, D. K., and Stewart, J. (2011). "PEST hydrology calibration process for source catchments - applied to the Great Barrier Reef, Queensland." *19th International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New-Zealand Inc.*, 2359-2366.
19. McKibbin, J., and Mahdi, T.-F. (2010). "Automatic Calibration Tool for River Models Based on the MHYSER Software." *Natural Hazards*, 54(3), 879-899.
20. Nujic, M. (2003). "HYDRO\_AS-2D A Two-Dimensional Flow Model For Water Mangement Applications User's Manual." Rosenheim, Deutschland.

21. Shettar, A. S., and Murthy, K. K. (1996). "A numerical Study of Division of Flow in Open Channels." *Journal of Hydraulic Research*, 34(5), 651-675.
22. Soares-Frazão, S. (2007). "Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2007.9521829, 19-26.
23. Tolossa, G. H. (2008). "Comparison of 2D Hydrodynamic models in River Reaches of Ecological Importance:HYDRO\_AS-2D and SRH-W." Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stuttgart.
24. Tolossa, H. G., Tuhtan, J., Schneider, M., and Wieprecht, S. "Comparison of 2D Hydrodynamic Models in River Reaches of Ecological Importance HYDRO\_AS-2D and SRH-W." *Proc., 33rd IAHR World Congress*, 604-611.
25. Vetsch, D. (2015). "System Manuals of Basement." Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, 178.
26. Zarrati, A. R., Tamai, N., and Jin, Y. C. (2005). "Mathematical Modeling of Meandering Channels with a Generalized Depth Averaged Model." *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(6), 467-475.

## CHAPITRE 7 COMPARAISON DE HSL-2D ET DES MODÈLES COMMERCIAUX

Ce dernier chapitre technique aborde le fonctionnement d'un modèle maison, *Hydraulique à Surface Libre 2D* (HSL-2D), basé sur la *Decoupled Hydrological Discretization* (DHD) ainsi que sa comparaison avec SRH-2D et HYDRO\_AS-2D. Cette discrétisation est proposée par Cea et Bladé (2015) et vise avant tout des usages hydrologiques tels que des pluies et écoulements sur bassins versants. On cherche ainsi à valider la programmation qui en a été faite et à vérifier comment un modèle simplifié peut se comparer à des modèles commerciaux.

### 7.1 Présentation du modèle

La discrétisation DHD a été présentée dans la revue de littérature et n'est donc pas reprise ici, seuls le fonctionnement du code et sa validation sont expliqués.

Le modèle est codé en langage de programmation MATLAB. L'effet de la pluie et de ses pertes sous forme d'évaporation ou d'infiltration n'est pas inclus, car inutile pour les cas-tests étudiés.

#### 7.1.1 Maillage

Le modèle se base sur le fichier .2dm créé par le logiciel de maillage SMS pour obtenir la géométrie et les informations concernant les nœuds, les mailles et les « nodestrings » du maillage. Seul le système d'unités SI est accepté.

#### 7.1.2 Pas de temps

Le pas de temps peut être déterminé de deux manières différentes. L'utilisateur peut choisir un pas de temps fixe qu'il détermine lui-même et qui est utilisé pendant toute la modélisation ou choisir un pas de temps variable qui est recalculé à chaque itération de façon à respecter la condition de Courant.

#### 7.1.3 Conditions aux frontières

Les conditions aux frontières acceptées sont un débit comme condition amont et un niveau d'eau constant à l'aval. Un niveau d'eau initial doit également être spécifié. Le débit entrant à la

condition amont est distribué sur les cellules de la section amont en fonction de la répartition de l'aire mouillée (Hydronia 2015):

$$q_j = Q \frac{A_j}{A_t l_j} \quad 7.1$$

Où  $q_j$  représente le débit unitaire entrant sur une cellule  $j$ ,  $Q$  le débit entrant total,  $A_t$  l'aire mouillée de la section amont et  $A_j$  l'aire mouillée de la cellule  $j$ .

#### 7.1.4 Paramètres de simulation

Les informations demandées à l'utilisateur sont les suivantes :

- Le nom du fichier .2dm contenant les informations du maillage, dont deux « nodestrings » qui représente les conditions frontière
- Le type de calcul du pas de temps, le pas de temps, la durée totale du calcul et l'intervalle de sortie des fichiers résultats
- Les coefficients de frottement de Manning qui peuvent être aussi nombreux que le nombre de zones définies dans le maillage
- Le débit à la condition amont et le niveau de l'eau à la condition aval
- Le niveau d'eau initial dans la rivière pour chaque zone

De plus, la limite de couvrant découvrant peut être modifiée, mais est fixée par défaut à 0.005 m.

#### 7.1.5 Fonctionnement

La première étape est la lecture du maillage et la création des matrices et vecteurs contenant les informations concernant les coordonnées des nœuds, des mailles et de leurs interfaces, les relations entre mailles voisines et leur situation par rapport aux conditions frontière (table 7.1).

Table 7.1. Vecteurs et matrices contenant les variables géométriques

Variable	Description
A	Aire de chaque cellule
centre	Coordonnées x, y et z du centre de chaque cellule
lc	Longueur et caractéristique (CF amont, aval, extérieur ou cellule intérieure) des interfaces de chaque cellule
mailles	Identification des nœuds de chaque maille
n	Vecteurs unitaires des interfaces de chaque cellule
nœuds	Coordonnées x, y et z de chaque nœud
voisine	Identification des mailles voisines de chaque maille

Le modèle demande ensuite à l'utilisateur les paramètres de simulations (durée de la simulation, intervalle de sortie des résultats, coefficients de Manning, conditions initiales et frontières) et crée les vecteurs et matrices contenant les profondeurs d'eau initiales qui permettent d'amorcer le calcul.

Par la suite, les itérations commencent avec pour chaque pas de temps et chaque cellule, la reconstruction des flux de masse et de momentum aux interfaces (côtés des cellules) puis le calcul des nouvelles valeurs de profondeurs d'eau et de débits unitaires. Si le temps de simulation écoulé correspond à un intervalle spécifié par l'utilisateur, les résultats sont écrits dans un fichier texte. À la fin de chaque itération sur le temps, le pas de temps est recalculé de manière à respecter la condition de courant. Cette dernière opération permet de grandement améliorer la stabilité d'une simulation.

À la fin du calcul, un fichier texte contenant les profondeurs d'eau de chaque pas de temps enregistré est créé pour être visualisé avec SMS. Le fonctionnement du programme est explicité à l'organigramme de la figure 7.1.

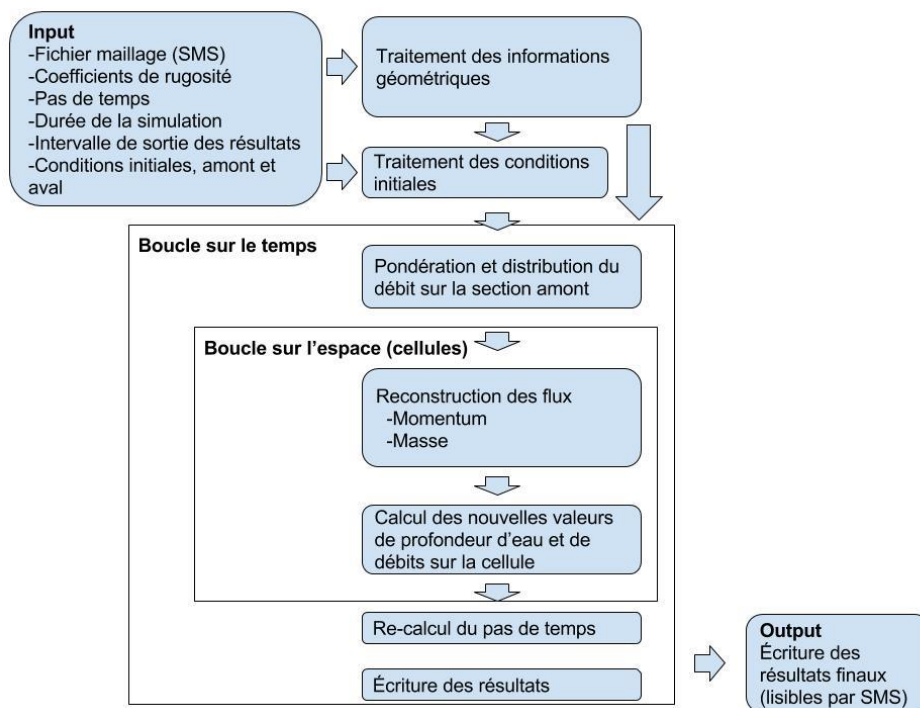


Figure 7.1. Fonctionnement et structure de la résolution – HSL-2D

### 7.1.6 Résultats

Les résultats, sous forme de fichiers texte, sont écrits à des intervalles réguliers (spécifié par l'utilisateur) et contiennent les coordonnées x, y et z de tous les nœuds ainsi que la profondeur d'eau et les deux composantes de la vitesse (figure 7.2). Un fichier récapitulatif lisible par SMS est écrit à la fin de la modélisation de manière à pouvoir visualiser les profondeurs d'eau tout au long du calcul.

```

ID  X    Y    Z    h    u    v
1. 0.0000 0.0000 0.0000 0.02404 0.23712 0.60101 -0.00015
2. 0.0000 0.0000 0.15240 0.02387 0.23676 0.60043 -0.00028
3. 0.0000 0.0000 0.30480 0.02527 0.23564 0.60074 -0.00024
4. 0.0000 0.0000 0.45720 0.02622 0.23524 0.60105 -0.00005
5. 0.0000 0.0000 0.60960 0.02616 0.23539 0.60088 -0.00025
6. 0.0000 0.0000 0.76200 0.02581 0.23557 0.60113 -0.00046
7. 0.0000 0.14700 0.00000 0.02385 0.23707 0.60067 0.00066
8. 0.0000 0.18166 0.14869 0.02414 0.23716 0.59900 0.00053
9. 0.0000 0.13564 0.29240 0.02396 0.23629 0.59962 -0.00008
10. 0.0000 0.10910 0.44886 0.02543 0.23542 0.60076 -0.00017
11. 0.0000 0.17949 0.57775 0.02472 0.23622 0.59893 -0.00057
12. 0.0000 0.14700 0.76200 0.02545 0.23597 0.59956 -0.00086
  
```

Figure 7.2. Exemple de fichier sortant



## 7.2 Comparaison

HSL-2D est comparé aux modèles commerciaux sur la base des mêmes cas-tests utilisés précédemment, soit des écoulements permanents sur canal avec seuil puis avec butée et un écoulement non permanent de type rupture de barrage sur un canal avec seuil. La comparaison prend la forme d'une analyse de sensibilité à la densité du maillage puis d'une comparaison de l'erreur (RMSE) sur la profondeur d'eau avec les résultats obtenus précédemment pour HYDRO\_AS-2D et SRH-2D et qui sont présentés à l'article 2. Le modèle est finalement utilisé pour modéliser un écoulement dans la rivière Cimarron.

Le recalcul automatique du pas de temps en fonction de la condition CFL est suspendu pour les trois cas-test d'écoulements en laboratoire ou un pas de temps fixe est imposé.

### 7.2.1 Configuration 2 – Canal avec seuil triangulaire

Les conditions de modélisation sont exactement les mêmes que celles énoncées au chapitre 5 lors de la comparaison entre SRH-2D et HYDRO\_AS-2D. Le débit est de  $0.108 \text{ m}^3/\text{s}$ , la profondeur d'eau qui agit comme condition frontière aval est de  $0.078 \text{ m}$ , les coefficients de Manning sont de  $0.017 \text{ s/m}^{1/3}$  pour le fond du canal et de  $0.014 \text{ s/m}^{1/3}$  pour le seuil. Les maillages ont des densités croissantes qui sont respectivement de  $102 \text{ mailles/m}^2$  (M1),  $250 \text{ mailles/m}^2$  (M2),  $1010 \text{ mailles/m}^2$  (M3). Toutes les modélisations sont menées avec un pas de temps de  $0.001 \text{ s}$  et le canal est initialement rempli avec une profondeur d'eau de  $0.1 \text{ m}$ .

Le modèle réagit bien au raffinement du maillage avec une erreur initiale relativement élevée, mais qui diminue constamment jusqu'à atteindre la valeur très acceptable de  $0.0066 \text{ m}$  (figure 7.3).

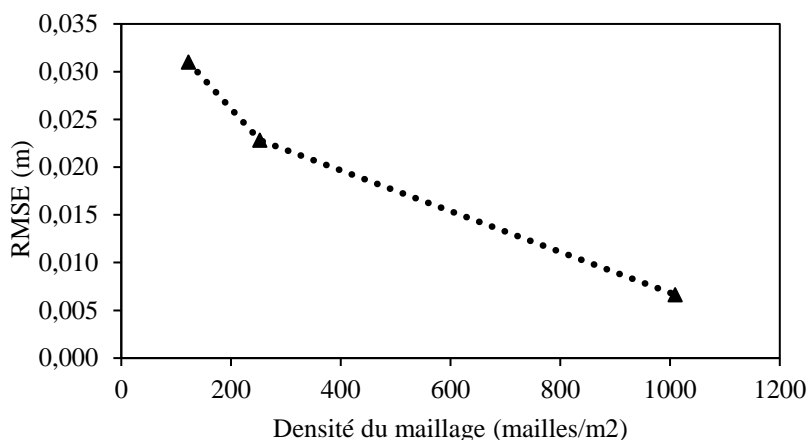


Figure 7.3. Analyse de sensibilité à la densité du maillage pour HSL-2D – Configuration 2

Lorsque comparé avec les deux modèles commerciaux (figure 7.4), les bénéfices de l’affinement du maillage apparaissent encore plus clairement. De fait, le modèle maison passe d’une RMSE considérablement plus élevée que celles de SRH-2D et HYDRO\_AS-2D avec le maillage 1 à une RMSE tout à fait comparable à celle de SRH-2D et même plus petite que celle de HYDRO\_AS-2D avec le maillage 3. Un raffinement supplémentaire du maillage est donc nécessaire pour obtenir des résultats comparables à ceux des modèles commerciaux.

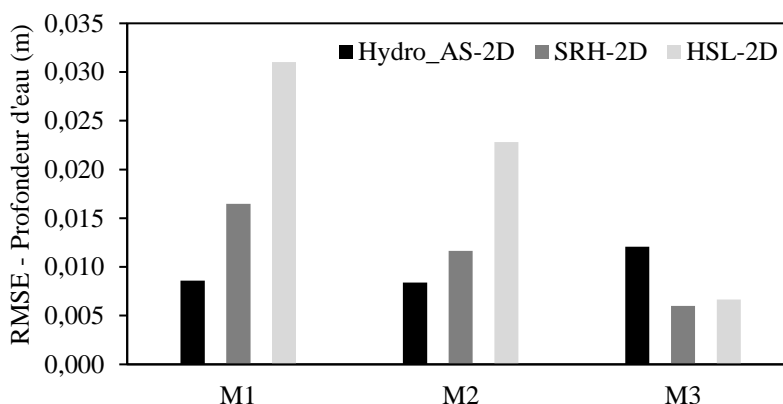


Figure 7.4. Comparaison de la RMSE sur la profondeur d’eau des trois modèles – Configuration 2

### 7.2.2 Configuration 3 – Canal avec butée triangulaire

Ici encore, les conditions de modélisations sont les mêmes que celles présentées au chapitre 5 avec un débit de  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , une profondeur d’eau et condition aval de  $0.14 \text{ m}$  et un coefficient de frottement de Manning de  $0.017 \text{ s/m}^{1/3}$ . Le pas de temps utilisé est de  $0.001 \text{ s}$  et les densités de

maillages sont identiques à celles de la configuration 2. La profondeur d'eau initiale est de 0.1m. Tout comme pour la configuration 2, l'analyse de sensibilité au maillage révèle une amélioration des résultats (figure 7.5) avec la densification du maillage. Cette amélioration est cependant négligeable puisque la RMSE passe de 0.0105 m à 0.0103 m. Le modèle maison réagit donc bien au raffinement du maillage même si ses effets sont limités.

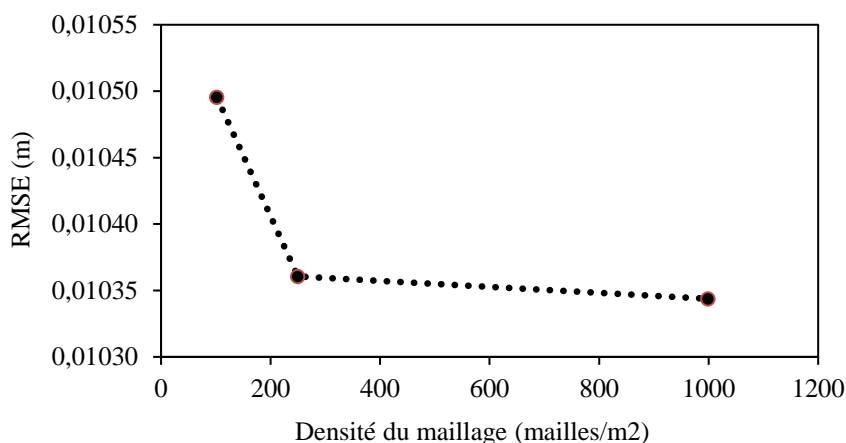


Figure 7.5. Analyse de sensibilité à la densité du maillage pour HSL-2D – Configuration 3

Dans ce cas, le modèle maison se compare relativement mal aux modèles commerciaux. La RMSE demeure stable, tel qu'énoncé ci-haut, et est d'environ le double de celles observées pour SRH-2D et HYDRO\_AS-2D (figure 7.6). HSL-2D devient plus précis que HYDRO\_AS-2D avec le maillage le plus fin mais ce n'est que parce que ce dernier y voit une grande détérioration de sa précision.

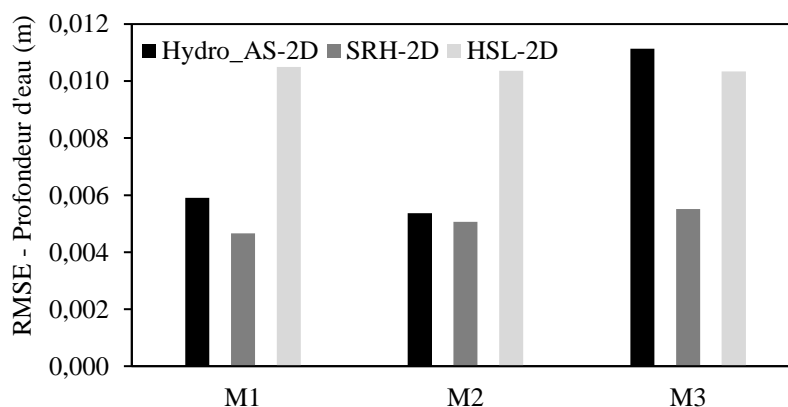


Figure 7.6. Comparaison de la RMSE sur la profondeur d'eau des trois modèles – Configuration 3

### 7.2.3 Rupture de barrage sur canal avec seuil triangulaire

Les conditions de modélisations sont identiques à celles présentées au chapitre 6– Article 2 à la différence que les deux maillages les plus fins ne sont pas considérés, donnant ainsi deux densités de 486 mailles/m<sup>2</sup> et 1932 mailles/m<sup>2</sup>. De plus, le seul pas de temps utilisé est de 0.005 s. Le coefficient de Manning est de 0.011 s/m<sup>1/3</sup> et les conditions initiales sont constituées d'un réservoir à l'amont du canal (0.111 m) et d'un bassin à l'aval (0.02 m). Les conditions aux frontières sont quatre murs.

Le modèle réagit bien au raffinement du maillage en particulier dans le cas de la jauge 1 qui voit sa RMSE réduite de 18% tandis que les jauges 2 et 3 ont des réductions respectives de 5% et 11% (figure 7.7).

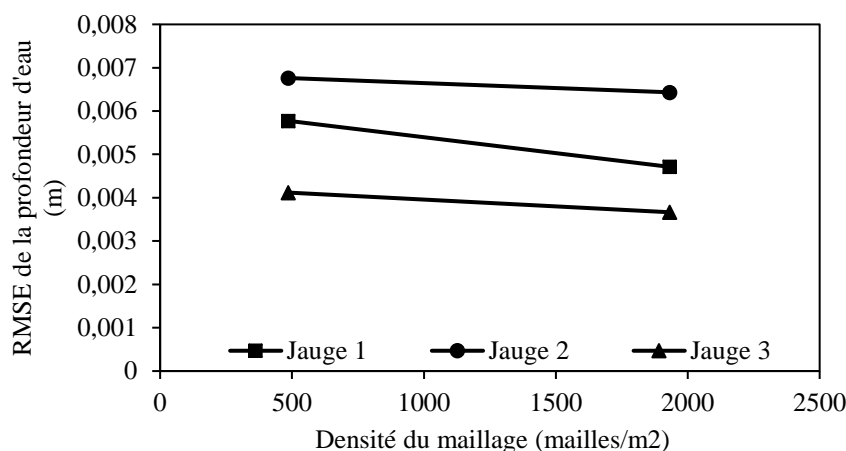


Figure 7.7. RMSE de la profondeur d'eau selon la densité du maillage- HSL-2D

La figure 7.8 et la figure 7.9 illustrent l'évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 en fonction du temps pour les deux maillages tout en la comparant aux données expérimentales. Tel que prédit par l'analyse de la RMSE, le modèle s'améliore considérablement avec le deuxième maillage. Pour les deux maillages, la forme est globalement respectée mais les multiples petites oscillations observées en laboratoire ne sont pas reproduites par le modèle. Pour une meilleure visualisation de la comparaison avec SRH-2D et HYDRO\_AS-2D, ces graphiques sont reproduits à l'annexe D en considérant cette fois les trois modèles.

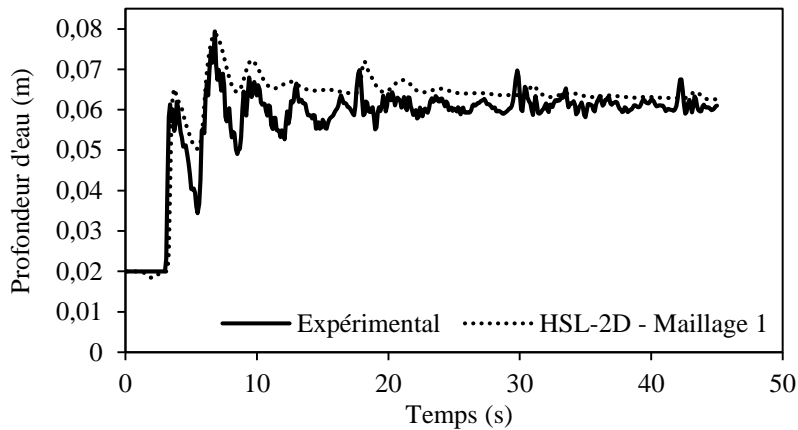


Figure 7.8. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 avec le maillage 1 – HSL-2D

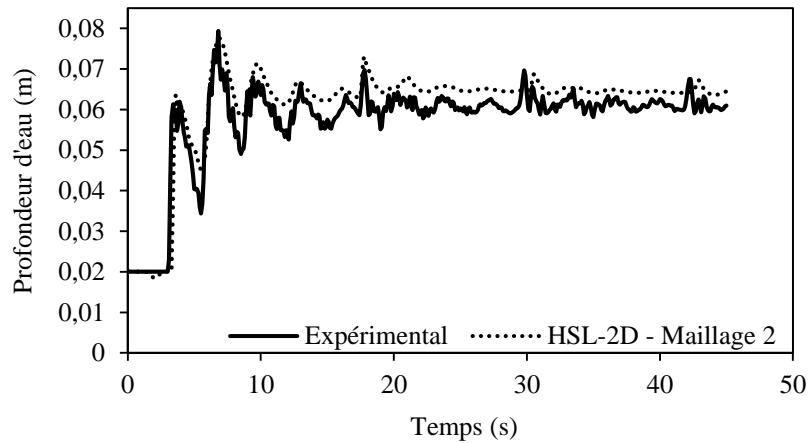


Figure 7.9. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 avec le maillage 2 – HSL-2D

Les résultats des trois modèles (SRH-2D, HYDRO\_AS-2D et HSL-2D) sont maintenant comparés en fonction de leur RMSE respective en chacune des trois jauges et pour les trois maillages discutés pour le modèle DHD.

La figure 7.10 et la figure 7.11 représentent respectivement les maillages 1 et 2 et présentent des comportements similaires. HYDRO\_AS-2D et HSL-2D ont des résultats très proches l'un de l'autre et SRH-2D semble être le modèle le moins précis puisque sa RMSE est systématiquement la plus élevée. L'écart de précision est surtout important à la jauge 3 alors que les deux autres modèles sont jusqu'à 2.51 (HYDRO\_AS-2D) et 2.49 (HSL-2D) fois plus précis.

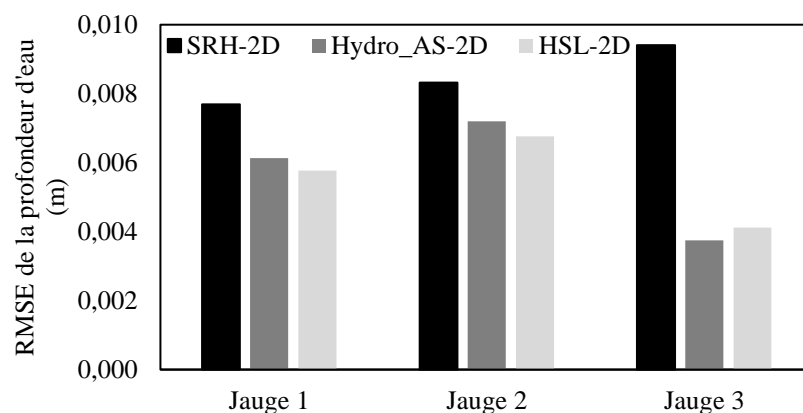


Figure 7.10. Comparaison des RMSE sur la profondeur d'eau des trois modèles - Maillage 1

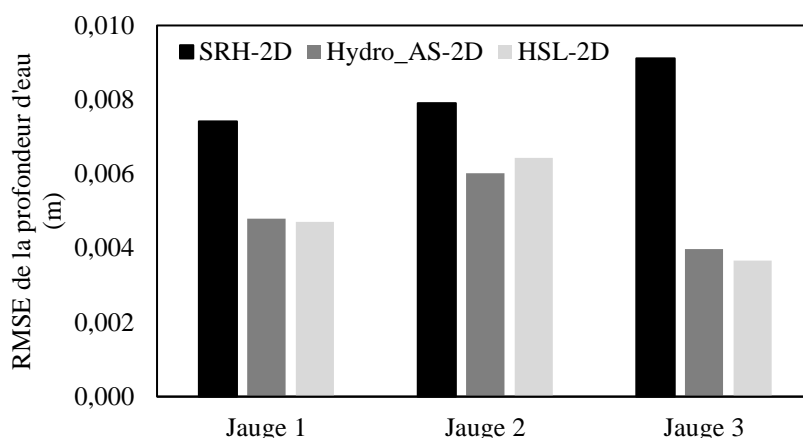


Figure 7.11. Comparaison des RMSE sur la profondeur d'eau des trois modèles – Maillage 2

Le temps de calcul de HSL-2D est sensiblement plus élevé que les modèles commerciaux. La figure 7.12 illustre cet écart et indique que SRH-2D est jusqu'à 34.2 fois plus rapide que HSL-2D (Maillage 1) tandis que HYDRO\_AS-2D est jusqu'à 60.7 fois plus rapide (Maillage 2). Cet écart ne doit cependant pas être imputé au schéma numérique DHD qui est explicite et, à pas de temps égal, est donc moins coûteux en calcul, mais plutôt à son implémentation qui n'a pas été optimisée pour le temps de calcul et du langage de programmation (MATLAB) qui peut être jusqu'à 11 fois plus lent que des langages comme FORTRAN ou C++ (Aruoba et Fernandez-Villaverde 2014).

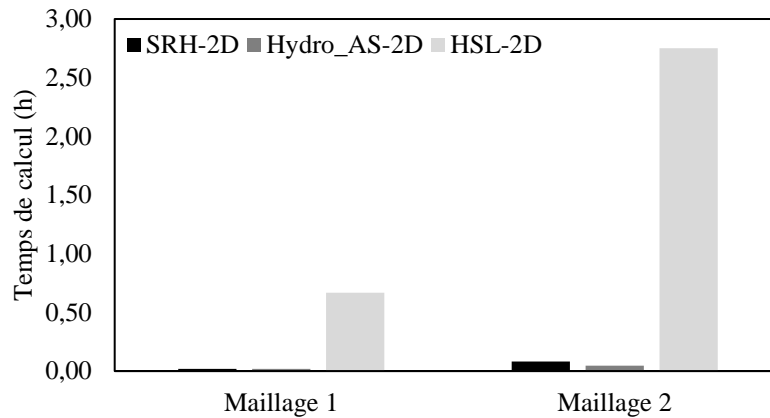


Figure 7.12. Temps de calcul

### 7.2.4 Rivière Cimarron

HSL-2D est finalement testé sur une rivière de façon à voir s'il réagit correctement à un domaine plus large et à une géométrie plus complexe. Le cas utilisé est un tronçon de la rivière Cimarron située dans le comté de Logan en Oklahoma, aux États-Unis (figure 7.13), dont la topographie est fournie dans les tutoriels du logiciel SMS (AQUAVEO 2016). Les données concernant les profondeurs d'eau et les vitesses ne sont pas disponibles, les modélisations présentées dans cette section ne permettent donc pas de dégager le meilleur modèle, mais ont plutôt pour but de vérifier si le modèle maison fournit des résultats comparables aux modèles commerciaux. La comparaison est ainsi menée sur les profondeurs d'eau et le temps de calcul de SRH-2D, HYDRO\_AS-2D et HSL-2D.

Le maillage utilisé couvre une superficie de 2.562 km<sup>2</sup> et est formé à partir d'une fonction de taille basée sur les gradients d'élévation. De fait, les longueurs des côtés des mailles varient entre 60 m, pour les secteurs les plus plats, et 10 m pour les secteurs ayant des gradients plus importants. Le maillage comporte 2891 mailles et 1567 nœuds (figure 7.14). L'équation utilisée est la suivante :

$$L_i = L_{max} - \frac{(\nabla z_{max} - \nabla z_i)}{(\nabla z_{max} - \nabla z_{min})} \cdot (L_{max} - L_{min}) \quad 7.2$$

Où  $L$  et  $\nabla z$  réfèrent respectivement à la longueur du côté d'une cellule  $i$  et à son gradient d'élévation.



Figure 7.13. Localisation du site : États-Unis (en haut à gauche), Oklahoma (en haut à droite) et rivière Cimarron (en bas). Source : Google Earth.

Les conditions aux frontières sont posées de façon arbitraire avec un débit amont permanent de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  et un niveau aval constant de 266.5m, ce qui correspond à une profondeur d'eau de 1.5 m par rapport au radier de la section aval. Le lit mineur est initialement rempli par 1 m d'eau tandis que les plaines inondables sont sèches. Le coefficient de rugosité de Manning utilisé est de  $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$ .

Étant donné que la comparaison est faite en écoulement permanent, la durée de la modélisation est fixée de manière à atteindre ce régime. Cette durée varie selon les modèles et est de 5 heures pour HYDRO\_AS-2D et HSL-2D et de 50 heures pour SRH-2D. Le pas de temps est calculé automatiquement pour HYDRO\_AS-2D ( $\Delta t_{\text{moyen}} = 1.15 \text{ s}$ ) et le modèle maison ( $\Delta t_{\text{moyen}} = 0.189 \text{ s}$ ) et est fixé par l'utilisateur pour SRH-2D ( $\Delta t = 1 \text{ s}$ ). La différence de pas de temps entre les deux modèles commerciaux et le modèle maison est due à la condition de courant qui est beaucoup plus sévère pour un schéma numérique explicite (DHD) que pour un schéma implicite (HYDRO\_AS-2D et SRH-2D). Pour atteindre la stabilité, la condition de courant est ici fixée à 0.1 :



$$\Delta t_i = 0.1 \frac{\min_{j \in K_i} L_{ij}}{|U|_i + \sqrt{gh_i}} \quad 2.34$$

La figure 7.14 présente les profondeurs d'eau telles que calculées tout au long de la rivière par les trois modèles après atteinte du régime permanent. SRH-2D et HYDRO\_AS-2D fournissent des résultats très similaires et les profondeurs d'eau les plus importantes (bleu foncé) sont calculées aux mêmes endroits. SRH-2D semble calculer des valeurs qui sont globalement plus élevées que HYDRO\_AS-2D. Le modèle maison donne un profil qui est semblable à ceux des autres modèles avec toutefois des profondeurs d'eau qui sont plus basses.

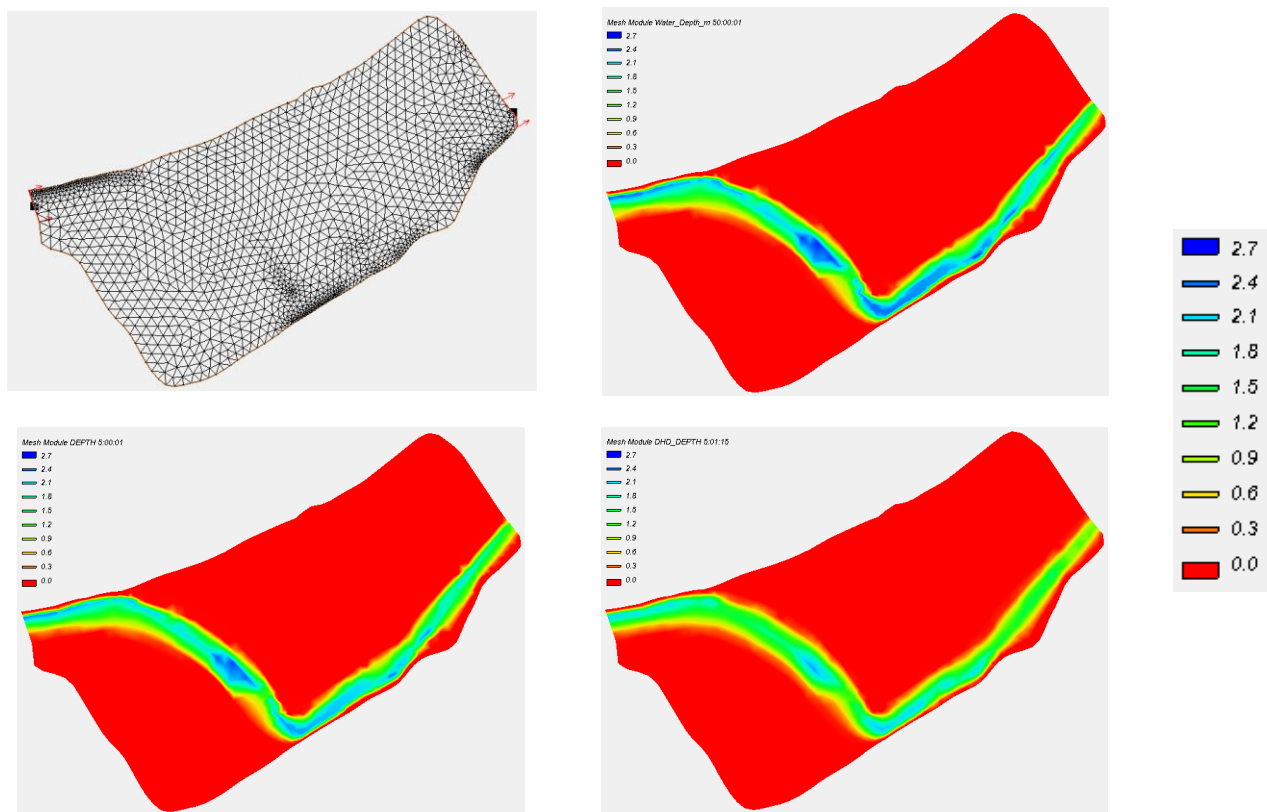


Figure 7.14. Maillage utilisé et profondeurs d'eau dans la rivière Cimarron telles que modélisées par SRH-2D (en haut à droite), HYDRO\_AS-2D (en bas à gauche) et le HSL-2D (en bas à droite)

Afin de quantifier les écarts entre les valeurs calculées des trois modèles, on s'intéresse aux différences de profondeurs d'eau classées. Celles-ci sont évaluées en valeurs absolues à chaque nœud et pour les trois combinaisons de modèles possibles soit HSL-2D/SRH-2D, HSL-2D/HYDRO\_AS-2D et SRH-2D/HYDRO\_AS-2D (figure 7.15). Le modèle maison diffère par des maximums de 1.08 m et 0.95 m lorsque comparé respectivement à SRH-2D et HYDRO\_AS-2D.

Si les deux modèles commerciaux sont comparés entre eux, la différence maximale est réduite à 0.55 m. Ces résultats supportent les observations précédentes selon lesquelles le modèle maison donne les profondeurs d'eau les plus éloignées tandis que SRH-2D et HYDRO\_AS-2D sont relativement proches avec des différences principalement contenues entre 0.09 m et 0.2 m. La RMSE, calculée pour chaque combinaison de modèles, permet de préciser l'écart moyen entre les résultats et milite pour la même conclusion alors que le modèle maison donne des différences de deux à trois fois plus élevées que les deux modèles commerciaux ensemble (table 7.2).

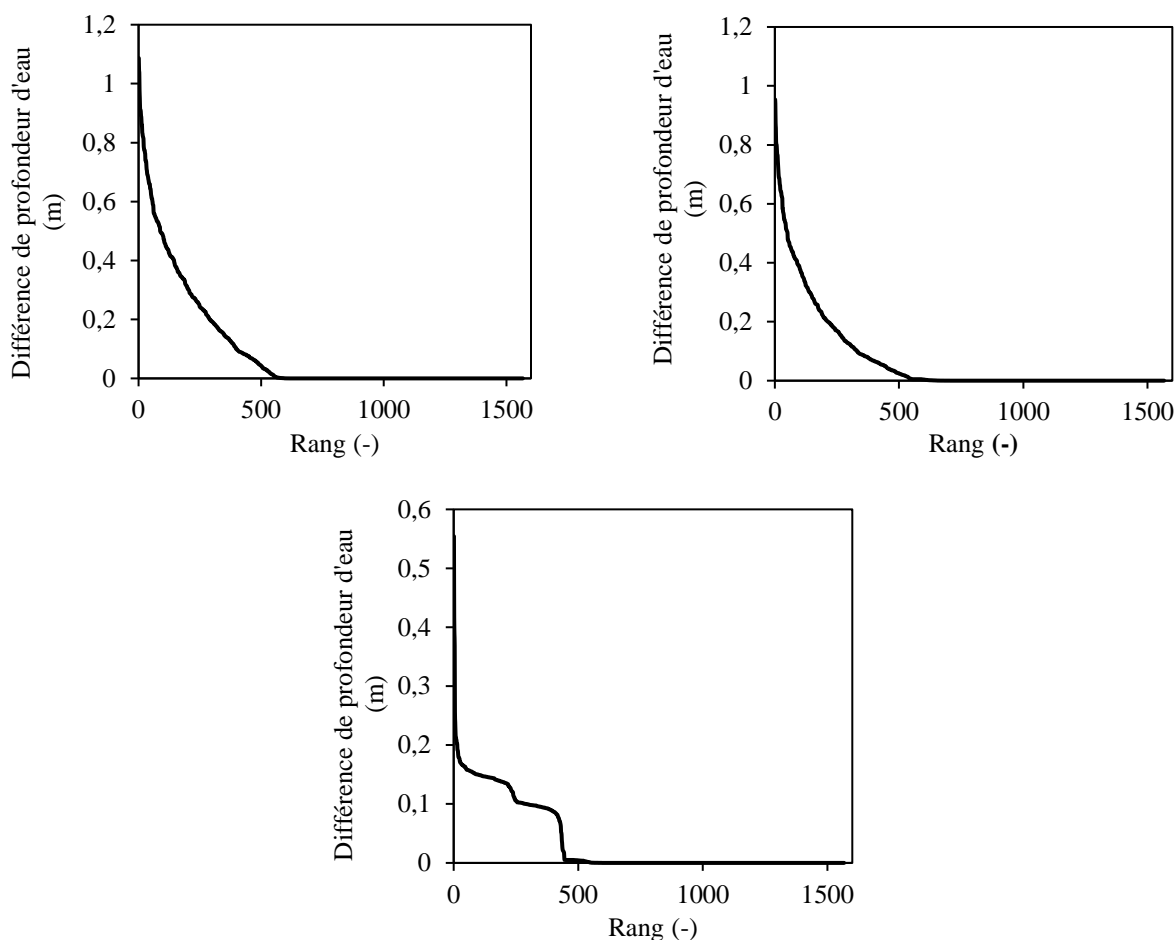


Figure 7.15. Différences de profondeurs d'eau en valeurs absolues classées entre: HSL-2D et SRH-2D (en haut à gauche), HSL-2D et HYDRO\_AS-2D (en haut à droite) et SRH-2D et HYDRO\_AS-2D (bas).

Table 7.2. Différences moyennes de profondeurs d'eau entre les modèles

Modèles comparés	RMSE (m)
HSL-2D et SRH-2D	0.212
HSL-2D et HYDRO_AS-2D	0.167
SRH-2D et HYDRO_AS-2D	0.071

Le temps de calcul est seulement comparé entre HYDRO\_AS-2D et le HSL-2D puisque les deux ont la même durée de simulation, ce qui n'est pas le cas de SRH-2D. Le modèle maison montre ici sa principale faiblesse alors que la modélisation nécessite plus de 17 heures de calcul tandis que HYDRO\_AS-2D réalise le même travail en seulement 36 secondes. Cet écart majeur est probablement dû, tel que mentionné pour les autres cas-tests, au fait que le modèle est implanté sur MATLAB qui n'est pas optimisé pour ce genre de calculs, mais également à la parallélisation de HYDRO\_AS-2D qui lui profite grandement et à la condition de courant qui est beaucoup plus restrictive pour la discrétisation DHD.

### 7.3 Discussion

HSL-2D réagit très bien aux différentes modélisations d'écoulements en laboratoire, que ce soit en écoulement permanent ou non permanent. Le modèle fournit une réponse adéquate au raffinement du maillage avec des résultats dont la précision va en augmentant. HSL-2D se compare très bien aux autres modèles alors que sa précision est généralement proche de celles des deux autres. Le modèle maison montre qu'il est également utilisable sur un cas plus complexe de rivière avec cependant des résultats qui diffèrent quelque peu des modèles commerciaux. De plus, la mise en œuvre sur le cas de rivière est plus difficile et les paramètres comme la condition de courant et la profondeur d'eau initiale doivent être choisis soigneusement pour assurer la stabilité. Le temps de calcul demeure la grande limite du modèle tel qu'implanté dans le cadre de ce projet, mais des améliorations sont possibles du fait de la relative simplicité du schéma numérique et du langage très généraliste utilisé (MATLAB).

## **CHAPITRE 8      DISCUSSION GÉNÉRALE**

L'objectif principal de ce mémoire consiste en la comparaison de trois modèles hydrodynamiques bidimensionnels utilisant la méthode des volumes finis. Cette comparaison a été réalisée en trois principales étapes, soit l'acquisition de données expérimentales, la comparaison des modèles commerciaux (SRH-2D et HYDRO\_AS-2D) puis la comparaison de ces mêmes modèles avec le modèle maison (HSL-2D).

### **8.1      Acquisition de données expérimentales**

La revue de littérature a souligné l'importance de disposer de données expérimentales de qualité dans la validation de modèles numériques. Il y est aussi fait mention du peu d'importance qui est généralement accordée à la détermination du coefficient de Manning. Ces deux points ont été abordés alors qu'un ensemble de données couvrant 9 cas d'écoulements différents est mis à disposition et qu'une nouvelle méthode faisant recours à la calibration automatique pour déterminer le coefficient de Manning dans un canal de laboratoire est proposée. Les objectifs spécifiques 1 et 2 sont ainsi atteints.

#### **8.1.1 Limitations**

Les données acquises n'incluent pas les vitesses et permettent uniquement la validation ou la comparaison de modèles sur la base des profondeurs d'eau.

### **8.2      Comparaison des modèles commerciaux**

La comparaison a ensuite été réalisée à l'aide des données expérimentales acquises pour l'écoulement permanent et des données d'une rupture de barrage (Soares-Frazão 2007) pour l'écoulement non permanent.

La comparaison en écoulement permanent donne des résultats ambivalents c'est-à-dire que les modèles ont chacun l'avantage sur un des deux écoulements. Toutefois, HYDRO\_AS-2D réagit mal lorsque le maillage est trop fin et montre une dégradation des résultats. Dans le cas-test de type rupture de barrage, les résultats continuent de s'améliorer avec le raffinement du maillage s'ils sont évalués sous l'angle de l'erreur moyenne (RMSE) mais montrent de plus en plus d'oscillations qui ne sont pas physiques. Dans les deux types d'écoulements, HYDRO\_AS-2D

présente donc une forme de dégradation des résultats avec un raffinement trop intense du maillage, ce qui n'est pas le cas de SRH-2D.

Dans le cas des écoulements permanents, les temps de calcul sont plus petits avec SRH-2D puisque celui-ci permet l'utilisation de plus grands pas de temps. Avec l'écoulement non permanent, HYDRO\_AS-2D est systématiquement plus précis et est plus rapide dans la majorité des cas. Dans tous les cas, lorsque les modèles sont comparés avec des pas de temps égaux, HYDRO\_AS-2D est plus rapide. Il serait intéressant dans de futurs travaux de comparer le temps de calcul des deux modèles en imposant l'utilisation d'un seul processeur à HYDRO\_AS-2D de manière à voir l'impact de la parallélisation des calculs. Les deux modèles réagissent correctement à la calibration automatique avec toutefois un avantage pour Hydro\_A-2D. Cette comparaison a permis de remplir les objectifs spécifiques 4, 5 et 6.

### **8.2.1 Limitations**

La comparaison présentée dans ce mémoire porte sur un certain nombre d'aspects, mais n'aborde pas le calcul des vitesses d'eau puisque ces valeurs sont plus difficiles à relever expérimentalement. Il s'agit là de la principale limitation de cette comparaison, car les modèles hydrodynamiques sont utilisés pour calculer ce paramètre, notamment pour quantifier le risque dans les études de sécurité de barrage. À noter également que cette comparaison utilise des cas-tests de petites dimensions, ce qui doit être pris en compte lors de l'application à des cas ayant des domaines plus larges.

## **8.3 Comparaison de HSL-2D aux modèles commerciaux**

Le modèle HSL-2D montre qu'il peut se comparer avantageusement aux modèles commerciaux et particulièrement à SRH-2D en ce qui a trait à la précision des profondeurs d'eau modélisées. Le modèle fonctionne sur des cas simples d'écoulement en laboratoire, mais également sur une topographie plus complexe de rivière. Tel que programmé sur MATLAB, HSL-2D est beaucoup plus lent que SRH-2D et HYDRO\_AS-2D. Ces résultats visent les objectifs spécifiques 3, 4 et 5.

### **8.3.1 Limitations**

HSL-2D comporte un certain nombre de limitations parmi lesquelles le fait que les équations de Saint-Venant telles que formulées par Cea et Bladé (2015) ne tiennent pas compte de la

turbulence, ce qui réduit la précision des résultats. Aussi, le schéma est découplé mathématiquement et la résolution se fait en une seule étape, c'est-à-dire sans les itérations de prédiction et correction comme dans des algorithmes de type SIMPLE, ce qui affecte également la précision. Le schéma est explicite, ce qui est très contraignant pour la condition de Courant et impose donc des pas de temps très bas et un temps de calcul plus élevé. De plus, le modèle est implanté sur MATLAB, qui est un langage moins approprié à ce genre de calcul que des langages comme FORTRAN ou C++, augmentant ainsi le temps de calcul.

## CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire avait pour objectif la comparaison des modèles hydrodynamiques bidimensionnels SRH-2D, HYDRO\_AS-2D et HSL-2D et ce, dans l'optique de fournir des arguments objectifs aux ingénieurs lors du choix d'un tel modèle. Cette comparaison a été menée sur deux groupes de données expérimentales, le premier représentant des écoulements permanents mesurés dans le cadre de ce projet et le second un écoulement non permanent de type rupture de barrage. L'analyse des résultats mène aux observations suivantes :

- La calibration automatique se compare avantageusement à la méthode pas par pas pour déterminer le coefficient de Manning d'un écoulement en laboratoire si elle est bornée par les valeurs théoriques du coefficient  $n$  : Chow (1959).
- Pour un même pas de temps, HYDRO\_AS-2D est systématiquement le modèle le plus rapide. SRH-2D permet à l'utilisateur de choisir lui-même le pas de temps ce qui le rend plus rapide que HYDRO\_AS-2D dans certains cas, particulièrement lorsque les mailles sont très petites (aux alentours de  $18 \text{ cm}^2$ ). À l'inverse, les temps de calcul sont similaires ou plus rapides avec HYDRO\_AS-2D pour les maillages les plus gros.
- La précision, évaluée sur le calcul des profondeurs d'eau, est généralement à l'avantage de HYDRO\_AS-2D à l'exception de certains maillages très fins (aux alentours de  $18 \text{ cm}^2$  /maille) pour les canaux avec seuil triangulaire et canal avec butée où SRH-2D est plus précis.
- Pour certains écoulements permanents, HYDRO\_AS-2D réagit mal à de très petits maillages et le module 1-step doit être utilisé au lieu du module régulier.
- La calibration automatique donne de bons résultats avec SRH-2D dans l'acquisition des données (article 1) mais est cependant plus efficace avec HYDRO\_AS-2D dans la comparaison directe (article 2).
- Le modèle HSL-2D donne des résultats très encourageants en terme de précision de calcul, mais est trop lent tel qu'implanté.

Ces observations se traduisent par un certain nombre de recommandations :

- Les paramètres de calibration automatique des coefficients de Manning d'un écoulement en laboratoire doivent être limités par des valeurs théoriques.
- HYDRO\_AS-2D est à privilégier pour la calibration automatique du coefficient de rugosité de Manning.
- SRH-2D est à privilégier pour la modélisation d'écoulements avec des maillages de très petites dimensions ou, s'il s'agit de régimes permanents, le module 1-step de HYDRO\_AS-2D peut également être utilisé.
- HYDRO\_AS-2D est à privilégier pour des écoulements avec des maillages de dimensions régulières.
- HSL-2D est suffisamment précis pour modéliser des écoulements simples. Le temps de calcul est cependant très handicapant.

Les modèles comparés ont montré être tous trois capables de modéliser des écoulements complexes avec succès. Les recommandations et observations précédentes permettront à l'ingénieur d'orienter son choix de modèle en fonction de ses besoins et contraintes.

Des développements ultérieurs à cette étude sont possibles et souhaitables. La comparaison pourrait par exemple être bonifiée par des cas-tests pour lesquels les vitesses sont connues. L'utilisation de cas-test ayant des domaines plus larges comme des rivières serait également souhaitable bien que de telles données soient rares sachant que les profondeurs d'eau, les vitesses et les coefficients de Manning doivent être connus avec exactitude.

Ce mémoire aura ainsi contribué à mettre en lumière les différences qui existent entre les modèles hydrodynamiques et de façon plus générale à souligner les limites de la modélisation bidimensionnelle qui est bien avancée mais demeure perfectible.

## **9.1 Contributions**

En plus des conclusions et recommandations énoncées précédemment, ce projet de maîtrise aura plus concrètement débouché sur deux articles scientifiques ainsi qu'un modèle hydrodynamique bidimensionnel maison.



Le premier article, soumis à la *Revue canadienne de génie civil* en date du 9 novembre 2016, s'intitule *Manning's Roughness Coefficient Determination in Laboratory Experiments Using 2D Modeling and Automatic Calibration*. Cet article met à disposition un vaste ensemble de données expérimentales permettant la validation ou la comparaison de modèles hydrodynamiques. Une attention particulière est apportée à la qualité et à la fiabilité des données, notamment à travers un traitement rigoureux et une analyse spécifique du coefficient de frottement de Manning.

Le second article, *Comparison of Two-Dimensional Flood Propagation Models: SRH-2D and HYDRO\_AS-2D*, a été soumis au journal *Natural Hazards* et accepté pour publication en date du 27 novembre 2016. L'ingénieur intéressé par les performances des modèles hydrodynamiques bidimensionnels y trouvera une série de recommandations objectives susceptibles de l'aider dans le choix d'un tel modèle.

Finalement, un modèle maison a été développé en langage MATLAB et a montré des capacités intéressantes par rapport aux modèles commerciaux. Ce modèle, moyennant développement, constitue une avenue encourageante pour une utilisation académique.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Alcrudo, F., et Mulet, J. (2004). "Conclusions and Recommendations from the IMPACT Project WP3: Flood Propagation."
2. AQUAVEO (2016). "SMS 12.1 - The Complete Surface-water Solution." <http://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction>. (March 10, 2016).
3. Aruoba, S. B., et Fernandez-Villaverde, J. (2014). "A comparison of Programming Languages in Economics." University of Maryland and University of Pennsylvania, 19.
4. Aureli, F., Maranzoni, A., Mignosa, P., et Ziveri, C. (2008). "Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:8(1089), 1089-1101.
5. Berger, R. C., Tate, J. N., Brown, G. L., et Savant, G. (2013). "Adaptive Hydraulics Users Manual." Coastal and Hydraulics Laboratory Engineer Research and Development Center, 99.
6. Bermudez, A., Dervieux, A., Desideri, J.-A., et Vazquez, M. E. (1998). "Upwind schemes for the two-dimensional shallow water equations with variable depth using unstructured meshes." *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 49-72.
7. Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica, sive De viribus et motibus fluidorum commentarii. Opus academicum ab auctore, dum Petropoli ageret, congestum, sumptibus Johannis Reinholdi Dulseckeri*.
8. BMTWBM (2014). "TUFLOW FV User Manual." *Flexible Mesh Modelling*, BMT WBM, Brisbane, Australia, 183.
9. Boussinesq, J. (1872). "Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond." *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 55-108.
10. Boz, Z., Erdogan, F., et Tutar, M. (2014). "Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating." *Journal of Food Engineering*, 8-16.
11. Brunner, G. W. (2016). "HEC-RAS River Analysis System User's Manual." US Army Corps of Engineers, Davis, CA, USA, 960.
12. Cea, L., et Bladé, E. (2015). "A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications." *Water Resources Research*, 5464-5486.
13. Chaudhry, H. (2008). *Open-Channel Flow*, Springer Science, New-York.
14. Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New-York.
15. Darcy, H., et Bazin, H. É. (1865). *Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts*, Imprimerie Nationale.

16. Dey, S., et Barbhuiya, K. (2005). "Flow Field at a Vertical-Wall Abutment." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:12(1126), 1126-1135.
17. Doherty (2005). "PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition." Watermark Numerical Computing.
18. Donnell, B. P. (2006). "RMA2 WES Version 4.5." I. King, J. V. Letter, W. H. McAnally, et W. A. Thomas, eds., US Army, Engineer Research and Development Center, 277.
19. Družeta, S., Sopta, L., Maćešić, S., et Črnjarić-Žic, N. (2009). "Investigation of the Importance of Spatial Resolution for Two-Dimensional Shallow-Water Model Accuracy." *Journal of Hydraulic Engineering*, 917-925.
20. Duan, J. G. (2009). "Mean Flow and Turbulence around a laboratory Spur Dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000077, 803-811.
21. Eberhart, P., Brajard, J., Fortin, P., et Jézéquel, F. "Estimation of Round-off Errors in OpenMP Codes." *Proc., 12th International Workshop on OpenMP*, Springer.
22. Ellis, R. J. I., Doherty, J., Searle, R. D., et Moodie, K. (2009). "Applying PEST (Parameter ESTimation) to improve parameter estimation and uncertainty analysis in WaterCAST models." *18th World IMACS/MODSIM Congress, Modelling and Simulation Society of Australia and New-Zealand Inc.*, 3158-3164.
23. Ettema, R. (2000). *Hydraulic Modeling: Concepts and Practice*, ASCE.
24. Fabio, P., Aronica, G. T., et Apel, H. (2010). "Towards automatic calibration of 2-D flood propagation models." *Hydrology and Earth System Sciences*, 10.5194/hess-14-911-2010, 911-924.
25. French, R. H. (1987). *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, New-York.
26. Froehlich, D. C. (2002). "User's Manual for FESWMS FST2DH." Federal Highway Administration, 209.
27. Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*, Macmillan Publishing Co., Inc., New-York.
28. Herschel, C. (1897). "On the origin of the Chézy formula." *Journal, Association of Engineering Societies*, 18, 363-368.
29. Hydronia (2015). "RiverFlow2D Plus Two-Dimensional Finite-Volume River Dynamics Model." Hydronia, Pembroke Pines, FL, USA, 157.
30. Jones, D. A. (2011). "The Transition from Earlier Hydrodynamic Models to Current Generation Models." Master of Science, Brigham Young University, Brigham.
31. Lai, Y. G. (2008). "SRH-2D version 2: Theory and User's Manual." U.S. Department of the interior - Bureau of Reclamation, Denver.
32. Lai, Y. G. (2010). "Two-Dimensional Depth-Averaged Flow Modeling with an Unstructured Hybrid Mesh." *Journal of Hydraulic Engineering*, 12-23.

33. LaRocque, L. A., Imran, J., et Chaudhry, M. H. (2013). "Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000705, 569-579.
34. Lavoie, B., et Mahdi, T.-F. (2016). "Comparison of two-dimensional Flood Propagation Models: SRH-2D and Hydro\_AS-2D." *Natural Hazards*.
35. Lin, Z. (2010). "Getting Started with PEST." The University of Georgia, Athens, GA.
36. MacDonald, I. (1996). "Analysis and Computation of Steady Open Channel Flow." Doctor of Philosophy, University of Reading, Reading, UK.
37. Manning, R. (1891). "On the flow of water in open channels and pipes." *Transactions, Institution of Civil Engineers of Ireland*, 20, 161-207.
38. McCloskey, G. L., Ellis, R. J., Waters, D. K., et Stewart, J. (2011). "PEST hydrology calibration process for source catchments - applied to the Great Barrier Reef, Queensland." *19th International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New-Zealand Inc.*, 2359-2366.
39. McKibbin, J., et Mahdi, T.-F. (2010). "Automatic Calibration Tool for River Models Based on the MHYSER Software." *Natural Hazards*, 54(3), 879-899.
40. Microsonic (2015). "mic+340/IU/TC." <<http://www.microsonic.de/en/distance-sensors/cylindrical/micplus/standard-sensors/standard-sensors/micplus340iuttc.htm>>. (March, 12, 2016).
41. Nujic, M. (2003). "Hydro\_AS-2D A Two-Dimensional Flow Model For Water Mangement Applications User's Manual." Rosenheim, Deutschland.
42. Oertel, M., et Bung, D. (2012). "Initial stage of two-dimensional dam-break waves: laboratory versus VOF." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2011.639981, 89-97.
43. OmniInstruments (2015). "MAG 910 Electromagnetic Flowmeter." <<http://www.omniinstruments.co.uk/flow-meters/electromagnetic-flow-meters-magnetic-flow-meters/mag910e-magnetic-flowmeter.html>>. (March, 12, 2016).
44. Ozmen-Cagatay, H., et Kocaman, S. (2010). "Dam break flows during initial stage using SWE and RANS approaches." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2010.507342, 603-611.
45. Ozmen-Cagatay, H., et Kocaman, S. (2011). "Dam-Break Flow in the Presence of Obstacle: Experiment and CFD Simulation." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10.1080/19942060.2011.11015393, 541-552.
46. Pichat, M., et Vignes, J. (1993). *Ingénierie du contrôle de la précision des calculs sur ordinateur*.
47. Protassov, K. (2002). *Analyse statistique de données expérimentales*, EDP Sciences, Les Ulis.
48. Saint-Venant, B. d. "Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit." *Proc., Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences*, Gauthier-Villars.

49. Shettar, A. S., et Murthy, K. K. (1996). "A numerical Study of Division of Flow in Open Channels." *Journal of Hydraulic Research*, 34(5), 651-675.
50. Soares-Frazão, S. (2007). "Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2007.9521829, 19-26.
51. Soares-Frazão, S., et Zech, Y. (2007). "Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2007.9521830, 27-36.
52. Soares-Frazão, S., et Zech, Y. (2008). "Dam-break flow through an idealised city." *Journal of Hydraulic Research*, 10.3826/jhr.2008.3164, 648-658.
53. Strickler, A. (1923). *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*, Eidg. Amt für Wasserwirtschaft Bern.
54. Testa, G., Zuccalà, D., Alcrudo, F., Mulet, J., et Soares-Frazão, S. (2007). "Flash flood flow experiment in a simplified urban district." *Journal of Hydraulic Research*, 10.1080/00221686.2007.9521831, 37-44.
55. Tolossa, G. H. (2008). "Comparison of 2D Hydrodynamic models in River Reaches of Ecological Importance:Hydro\_AS-2D and SRH-W." Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stuttgart.
56. Tolossa, H. G., Tuhtan, J., Schneider, M., et Wieprecht, S. "Comparison of 2D Hydrodynamic Models in River Reaches of Ecological Importance Hydro\_AS-2D and SRH-W." *Proc., 33rd IAHR World Congress*, 604-611.
57. Toro, E. F. (2009). *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics - A Practical Introduction*, Springer.
58. Versteeg, H. k., et Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*, Longman Scientific and Technical.
59. Vetsch, D. (2015). "System Manuls of Basement." Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, 178.
60. Vidal, J.-P., Moisan, S., Faure, J.-B., et Dartus, D. (2007). "River model calibration, from guidelines to operational support tools." *Environmental Modelling and Software*(22), 1628-1640.
61. Warmink, J. J., Van der Klis, H., Booij, M. J., et Hulscher, S. J. M. H. (2010). "Identification and Quantification of Uncertainties in a Hydrodynamic River Model Using Expert Opinions." *Water Resources Management*, 10.1007/s11269-010-9716-7, 601-622.
62. Zarrati, A. R., Tamai, N., et Jin, Y. C. (2005). "Mathematical Modeling of Meandering Channels with a Generalized Depth Averaged Model." *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(6), 467-475.

## ANNEXE A – FICHIER COMPLÉMENTAIRE À L'ARTICLE 1 – CONFIGURATION 1

Cette annexe contient les coordonnées et les profondeurs d'eau nécessaires à la modélisation de la configuration 1 telles que distribuées avec l'article 1.

Initial flatbed channel - 3 flow cases

-----  
Boundary conditions:

Minimum inflow:  $Q=0.031 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.074\text{m}$

Medium inflow:  $Q=0.073 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.120\text{m}$

Maximum inflow:  $Q=0.101 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.144\text{m}$

$h_{\min}$ ,  $h_{\text{med}}$  and  $h_{\max}$  refer to water depth for minimum, medium and maximum discharges.

All values are in SI units.

-----

ID	X	Y	Z	$h_{\min}$	$h_{\text{med}}$	$h_{\max}$
1.000	0.000	0.191	0.024	-	-	-
2.000	0.000	0.381	0.026	-	-	-
3.000	0.000	0.572	0.026	-	-	-
4.000	1.100	0.095	0.017	-	-	-
5.000	1.100	0.191	0.015	0.076	0.124	0.153
6.000	1.100	0.381	0.017	0.075	0.123	0.156
7.000	1.100	0.572	0.018	0.074	0.121	0.151
8.000	1.100	0.667	0.016	-	-	-
9.000	1.525	0.095	0.015	-	-	-
10.000	1.525	0.191	0.015	-	-	-
11.000	1.525	0.381	0.015	-	-	-
12.000	1.525	0.572	0.015	-	-	-
13.000	1.525	0.667	0.015	-	-	-
14.000	1.950	0.095	0.015	-	-	-
15.000	1.950	0.191	0.015	0.075	0.124	0.156

16.000	1.950	0.381	0.015	0.074	0.124	0.154
17.000	1.950	0.572	0.015	0.076	0.124	0.157
18.000	1.950	0.667	0.013	-	-	-
19.000	2.375	0.095	0.015	-	-	-
20.000	2.375	0.191	0.014	-	-	-
21.000	2.375	0.381	0.014	-	-	-
22.000	2.375	0.572	0.014	-	-	-
23.000	2.375	0.667	0.014	-	-	-
24.000	2.800	0.095	0.012	-	-	-
25.000	2.800	0.191	0.013	0.075	0.124	0.154
26.000	2.800	0.381	0.013	0.076	0.124	0.153
27.000	2.800	0.572	0.012	0.076	0.125	0.154
28.000	2.800	0.667	0.012	-	-	-
29.000	3.225	0.095	0.012	-	-	-
30.000	3.225	0.191	0.011	-	-	-
31.000	3.225	0.381	0.011	-	-	-
32.000	3.225	0.572	0.011	-	-	-
33.000	3.225	0.667	0.011	-	-	-
34.000	3.650	0.095	0.010	-	-	-
35.000	3.650	0.191	0.010	0.077	0.126	0.154
36.000	3.650	0.381	0.010	0.076	0.125	0.151
37.000	3.650	0.572	0.010	0.076	0.125	0.153
38.000	3.650	0.667	0.009	-	-	-
39.000	4.075	0.095	0.008	-	-	-
40.000	4.075	0.191	0.009	-	-	-
41.000	4.075	0.381	0.009	-	-	-
42.000	4.075	0.572	0.006	-	-	-
43.000	4.075	0.667	0.009	-	-	-
44.000	4.500	0.095	0.007	-	-	-
45.000	4.500	0.191	0.005	0.080	0.127	0.158
46.000	4.500	0.381	0.008	0.077	0.125	0.153
47.000	4.500	0.572	0.006	0.079	0.127	0.157
48.000	4.500	0.667	0.008	-	-	-

49.000	4.925	0.095	0.008	-	-	-
50.000	4.925	0.191	0.008	-	-	-
51.000	4.925	0.381	0.008	-	-	-
52.000	4.925	0.572	0.008	-	-	-
53.000	4.925	0.667	0.008	-	-	-
54.000	5.350	0.095	0.007	-	-	-
55.000	5.350	0.191	0.006	0.076	0.123	0.148
56.000	5.350	0.381	0.005	0.076	0.124	0.148
57.000	5.350	0.572	0.007	0.076	0.123	0.148
58.000	5.350	0.667	0.007	-	-	-
59.000	5.775	0.095	0.006	-	-	-
60.000	5.775	0.191	0.008	-	-	-
61.000	5.775	0.381	0.006	-	-	-
62.000	5.775	0.572	0.006	-	-	-
63.000	5.775	0.667	0.006	-	-	-
64.000	6.200	0.095	0.005	-	-	-
65.000	6.200	0.191	0.006	0.074	0.120	0.144
66.000	6.200	0.381	0.006	0.073	0.120	0.146
67.000	6.200	0.572	0.006	0.074	0.120	0.144
68.000	6.200	0.667	0.005	-	-	-
69.000	6.700	0.095	0.000	-	-	-
70.000	6.700	0.191	0.004	0.075	0.121	0.144
71.000	6.700	0.381	0.006	0.073	0.118	0.144
72.000	6.700	0.572	0.004	0.075	0.121	0.144
73.000	6.700	0.667	0.005	-	-	-



## ANNEXE B – FICHIER COMPLÉMENTAIRE À L'ARTICLE 1 – CONFIGURATION 2

Cette annexe contient les coordonnées et les profondeurs d'eau nécessaires à la modélisation de la configuration 2 telles que distribuées avec l'article 1.

Channel with triangular sill - 3 flow cases

Boundary conditions:

Minimum inflow:  $Q=0.041 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.035 \text{ m}$

Medium inflow:  $Q=0.070 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.055 \text{ m}$

Maximum inflow:  $Q=0.108 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.078 \text{ m}$

$h_{\min}$ ,  $h_{\text{med}}$  and  $h_{\max}$  refer to water depth for minimum, medium and maximum discharges.

All values are in SI units.

ID	X	Y	Z	h min	h med	h max
1.000	0.000	0.191	0.024	-	-	-
2.000	0.000	0.381	0.026	-	-	-
3.000	0.000	0.572	0.026	-	-	-
4.000	1.100	0.095	0.017	-	-	-
5.000	1.100	0.191	0.015	0.201	0.231	0.266
6.000	1.100	0.381	0.017	0.199	0.230	0.265
7.000	1.100	0.572	0.018	0.198	0.228	0.263
8.000	1.100	0.667	0.016	-	-	-
9.000	1.525	0.095	0.015	-	-	-
10.000	1.525	0.191	0.015	-	-	-
11.000	1.525	0.381	0.015	-	-	-
12.000	1.525	0.572	0.015	-	-	-
13.000	1.525	0.667	0.015	-	-	-
14.000	1.950	0.095	0.015	-	-	-
15.000	1.950	0.191	0.015	0.201	0.232	0.266
16.000	1.950	0.381	0.015	0.201	0.232	0.265

17.000	1.950	0.572	0.015	0.200	0.232	0.266
18.000	1.950	0.667	0.013	-	-	-
19.000	2.375	0.095	0.015	-	-	-
20.000	2.375	0.191	0.014	-	-	-
21.000	2.375	0.381	0.014	-	-	-
22.000	2.375	0.572	0.014	-	-	-
23.000	2.375	0.667	0.014	-	-	-
24.000	2.800	0.095	0.012	-	-	-
25.000	2.800	0.191	0.013	0.202	0.233	0.267
26.000	2.800	0.381	0.013	0.202	0.233	0.267
27.000	2.800	0.572	0.012	0.203	0.234	0.267
28.000	2.800	0.667	0.012	-	-	-
29.000	3.225	0.095	0.012	-	-	-
30.000	3.225	0.191	0.011	-	-	-
31.000	3.225	0.381	0.011	-	-	-
32.000	3.225	0.572	0.011	-	-	-
33.000	3.225	0.667	0.011	-	-	-
34.000	3.650	0.095	0.010	-	-	-
35.000	3.650	0.191	0.010	0.205	0.236	0.270
36.000	3.650	0.381	0.010	0.205	0.236	0.270
37.000	3.650	0.572	0.010	0.205	0.236	0.270
38.000	3.650	0.667	0.009	-	-	-
39.000	4.075	0.095	0.008	-	-	-
40.000	4.075	0.191	0.009	-	-	-
41.000	4.075	0.381	0.009	-	-	-
42.000	4.075	0.572	0.006	-	-	-
43.000	4.075	0.667	0.009	-	-	-
44.000	4.500	0.095	0.007	-	-	-
45.000	4.500	0.191	0.005	0.210	0.242	0.275
46.000	4.500	0.381	0.008	0.207	0.239	0.272
47.000	4.500	0.572	0.006	0.210	0.241	0.274
48.000	4.500	0.667	0.008	-	-	-
49.000	4.925	0.095	0.008	-	-	-

50.000	4.925	0.191	0.008	-	-	-
51.000	4.925	0.381	0.008	-	-	-
52.000	4.925	0.572	0.008	-	-	-
53.000	4.925	0.667	0.008	-	-	-
54.000	5.300	0.095	0.012	-	-	-
55.000	5.300	0.191	0.013	0.201	0.231	0.263
56.000	5.300	0.381	0.015	0.199	0.230	0.262
57.000	5.300	0.572	0.013	0.201	0.231	0.263
58.000	5.300	0.667	0.013	-	-	-
59.000	5.332	0.095	0.012	-	-	-
60.000	5.332	0.191	0.013	-	-	-
61.000	5.332	0.381	0.015	-	-	-
62.000	5.332	0.572	0.013	-	-	-
63.000	5.332	0.667	0.013	-	-	-
64.000	5.450	0.095	0.068	-	-	-
65.000	5.450	0.191	0.069	0.141	0.169	0.198
66.000	5.450	0.381	0.071	0.139	0.167	0.197
67.000	5.450	0.572	0.068	0.142	0.170	0.199
68.000	5.450	0.667	0.070	-	-	-
69.000	5.570	0.095	0.125	-	-	-
70.000	5.570	0.191	0.125	0.075	0.100	0.130
71.000	5.570	0.381	0.128	0.072	0.099	0.126
72.000	5.570	0.572	0.123	0.076	0.102	0.130
73.000	5.570	0.667	0.128	-	-	-
74.000	5.690	0.095	0.063	-	-	-
75.000	5.690	0.191	0.058	-	-	-
76.000	5.690	0.381	0.052	-	-	-
77.000	5.690	0.572	0.054	-	-	-
78.000	5.690	0.667	0.050	-	-	-
79.000	5.802	0.095	0.007	-	-	-
80.000	5.802	0.191	0.007	-	-	-
81.000	5.802	0.381	0.007	-	-	-
82.000	5.802	0.572	0.007	-	-	-

83.000	5.802	0.667	0.008	-	-	-
84.000	5.840	0.095	0.007	-	-	-
85.000	5.840	0.191	0.007	-	-	-
86.000	5.840	0.381	0.007	-	-	-
87.000	5.840	0.572	0.007	-	-	-
88.000	5.840	0.667	0.008	-	-	-
89.000	6.200	0.095	0.005	-	-	-
90.000	6.200	0.191	0.006	0.030	0.051	0.074
91.000	6.200	0.381	0.006	0.030	0.051	0.074
92.000	6.200	0.572	0.006	0.033	0.053	0.075
93.000	6.200	0.667	0.005	-	-	-
94.000	6.700	0.095	0.000	-	-	-
95.000	6.700	0.191	0.004	0.035	0.055	0.079
96.000	6.700	0.381	0.006	0.033	0.053	0.076
97.000	6.700	0.572	0.004	0.037	0.058	0.079
98.000	6.700	0.667	0.005	-	-	-

## ANNEXE C – FICHIER COMPLÉMENTAIRE À L'ARTICLE 1 – CONFIGURATION 3

Cette annexe contient les coordonnées et les profondeurs d'eau nécessaires à la modélisation de la configuration 3 telles que distribuées avec l'article 1.

Channel with triangular abutment - 3 flow cases

-----  
Boundary conditions:

Minimum inflow:  $Q=0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.086 \text{ m}$

Medium inflow:  $Q=0.064 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.112 \text{ m}$

Maximum inflow:  $Q=0.100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h=0.140 \text{ m}$

$h_{\min}$ ,  $h_{\text{med}}$  and  $h_{\max}$  refer to water depth for minimum, medium and maximum discharges.

All values are in SI units.

-----

ID	X	Y	Z	$h_{\min}$	$h_{\text{med}}$	$h_{\max}$
1.000	0.000	0.191	0.024	-	-	-
2.000	0.000	0.381	0.026	-	-	-
3.000	0.000	0.572	0.026	-	-	-
4.000	1.100	0.095	0.017	-	-	-
5.000	1.100	0.191	0.015	0.097	0.129	0.170
6.000	1.100	0.381	0.017	0.096	0.127	0.170
7.000	1.100	0.572	0.018	0.094	0.125	0.167
8.000	1.100	0.667	0.016	-	-	-
9.000	1.525	0.095	0.015	-	-	-
10.000	1.525	0.191	0.015	0.097	0.128	0.172
11.000	1.525	0.381	0.015	0.097	0.130	0.169
12.000	1.525	0.572	0.015	0.097	0.128	0.173
13.000	1.525	0.667	0.015	-	-	-
14.000	1.950	0.095	0.015	-	-	-
15.000	1.950	0.191	0.015	0.095	0.125	0.167

16.000	1.950	0.381	0.015	0.095	0.125	0.170
17.000	1.950	0.572	0.015	0.099	0.131	0.174
18.000	1.950	0.667	0.013	-	-	-
19.000	2.375	0.095	0.015	-	-	-
20.000	2.375	0.191	0.014	-	-	-
21.000	2.375	0.381	0.014	-	-	-
22.000	2.375	0.572	0.014	-	-	-
23.000	2.375	0.667	0.014	-	-	-
24.000	2.800	0.095	0.012	-	-	-
25.000	2.800	0.191	0.013	-	-	-
26.000	2.800	0.381	0.013	-	-	-
27.000	2.800	0.572	0.012	-	-	-
28.000	2.800	0.667	0.012	-	-	-
29.000	3.225	0.095	0.012	-	-	-
30.000	3.225	0.191	0.011	-	-	-
31.000	3.225	0.381	0.011	-	-	-
32.000	3.225	0.572	0.011	-	-	-
33.000	3.225	0.667	0.011	-	-	-
34.000	3.650	0.095	0.010	-	-	-
35.000	3.650	0.191	0.010	0.086	0.117	0.159
36.000	3.650	0.381	0.010	0.084	0.118	0.154
37.000	3.650	0.572	0.010	0.086	0.113	0.149
38.000	3.650	0.667	0.009	-	-	-
39.000	4.075	0.095	0.008	-	-	-
40.000	4.075	0.191	0.009	-	-	-
41.000	4.075	0.381	0.009	-	-	-
42.000	4.075	0.572	0.006	-	-	-
43.000	4.075	0.667	0.009	-	-	-
44.000	4.500	0.095	0.007	-	-	-
45.000	4.500	0.191	0.005	0.091	0.121	0.155
46.000	4.500	0.381	0.008	0.088	0.122	0.151
47.000	4.500	0.572	0.006	0.092	0.119	0.153
48.000	4.500	0.667	0.008	-	-	-

49.000	4.925	0.095	0.008	-	-	-
50.000	4.925	0.191	0.008	-	-	-
51.000	4.925	0.381	0.008	-	-	-
52.000	4.925	0.572	0.008	-	-	-
53.000	4.925	0.667	0.008	-	-	-
54.000	5.350	0.095	0.007	-	-	-
55.000	5.350	0.191	0.006	0.090	0.107	0.140
56.000	5.350	0.381	0.005	0.090	0.111	0.145
57.000	5.350	0.572	0.007	0.088	0.112	0.146
58.000	5.350	0.667	0.007	-	-	-
59.000	5.775	0.095	0.006	-	-	-
60.000	5.775	0.191	0.008	-	-	-
61.000	5.775	0.381	0.006	-	-	-
62.000	5.775	0.572	0.006	-	-	-
63.000	5.775	0.667	0.006	-	-	-
64.000	6.200	0.095	0.005	-	-	-
65.000	6.200	0.191	0.006	0.086	0.115	0.142
66.000	6.200	0.381	0.006	0.086	0.113	0.141
67.000	6.200	0.572	0.006	0.085	0.111	0.143
68.000	6.200	0.667	0.005	-	-	-
69.000	6.700	0.095	0.000	-	-	-
70.000	6.700	0.191	0.004	0.087	0.113	0.140
71.000	6.700	0.381	0.006	0.084	0.110	0.139
72.000	6.700	0.572	0.004	0.087	0.112	0.142
73.000	6.700	0.667	0.005	-	-	-

## ANNEXE D – GRAPHIQUES COMPLÉMENTAIRES – CAS-TEST DE RUPTURE DE BARRAGE

Cette annexe présente l'évolution de la profondeur d'eau pour les deux maillages les plus grossiers utilisés aux chapitres 6 et 7 en considérant cette fois les trois modèles (SRH-2D, HYDRO\_AS-2D et HSL-2D) sur un même graphique.

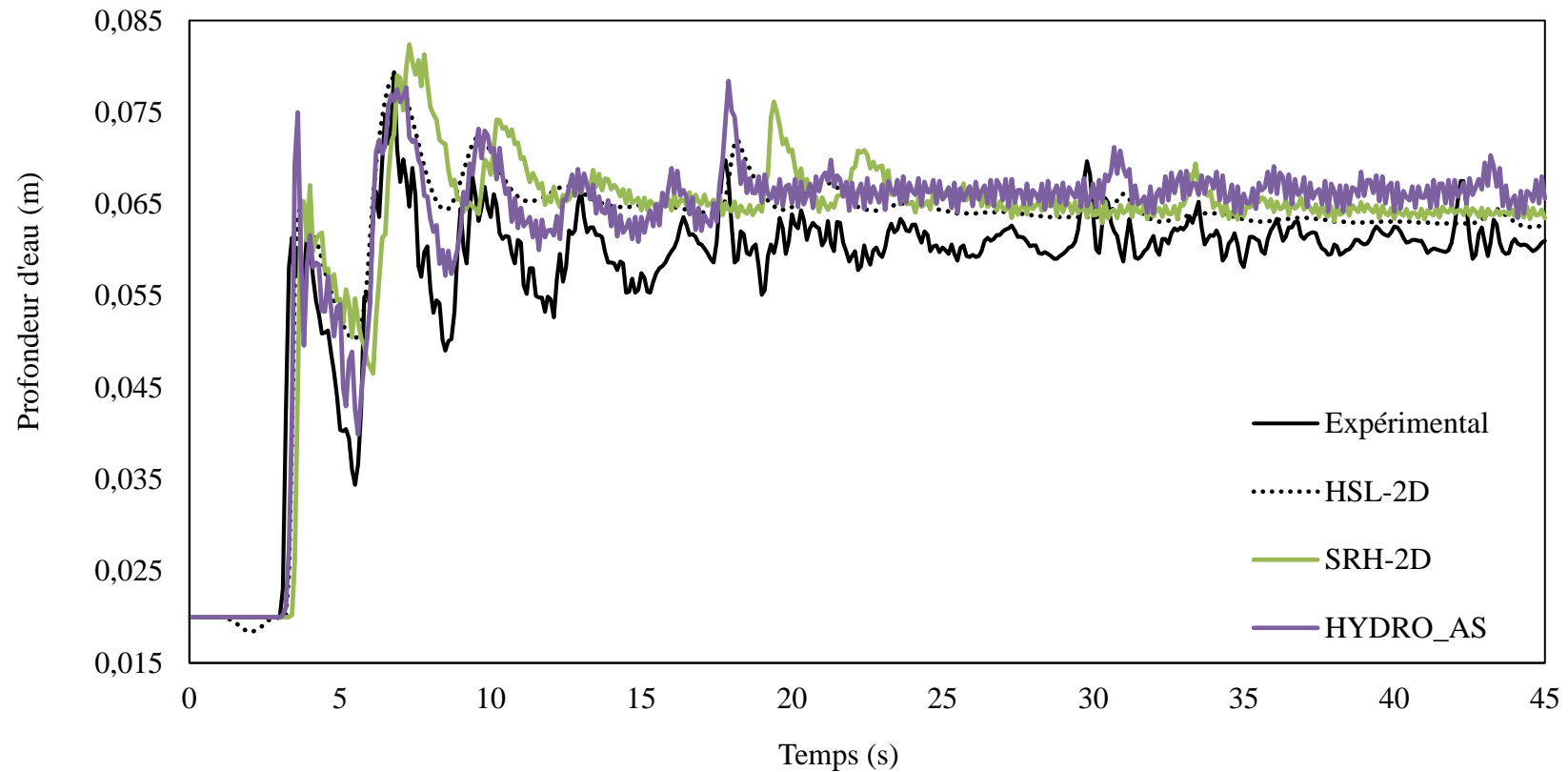


Figure D.1. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 – Maillage 1



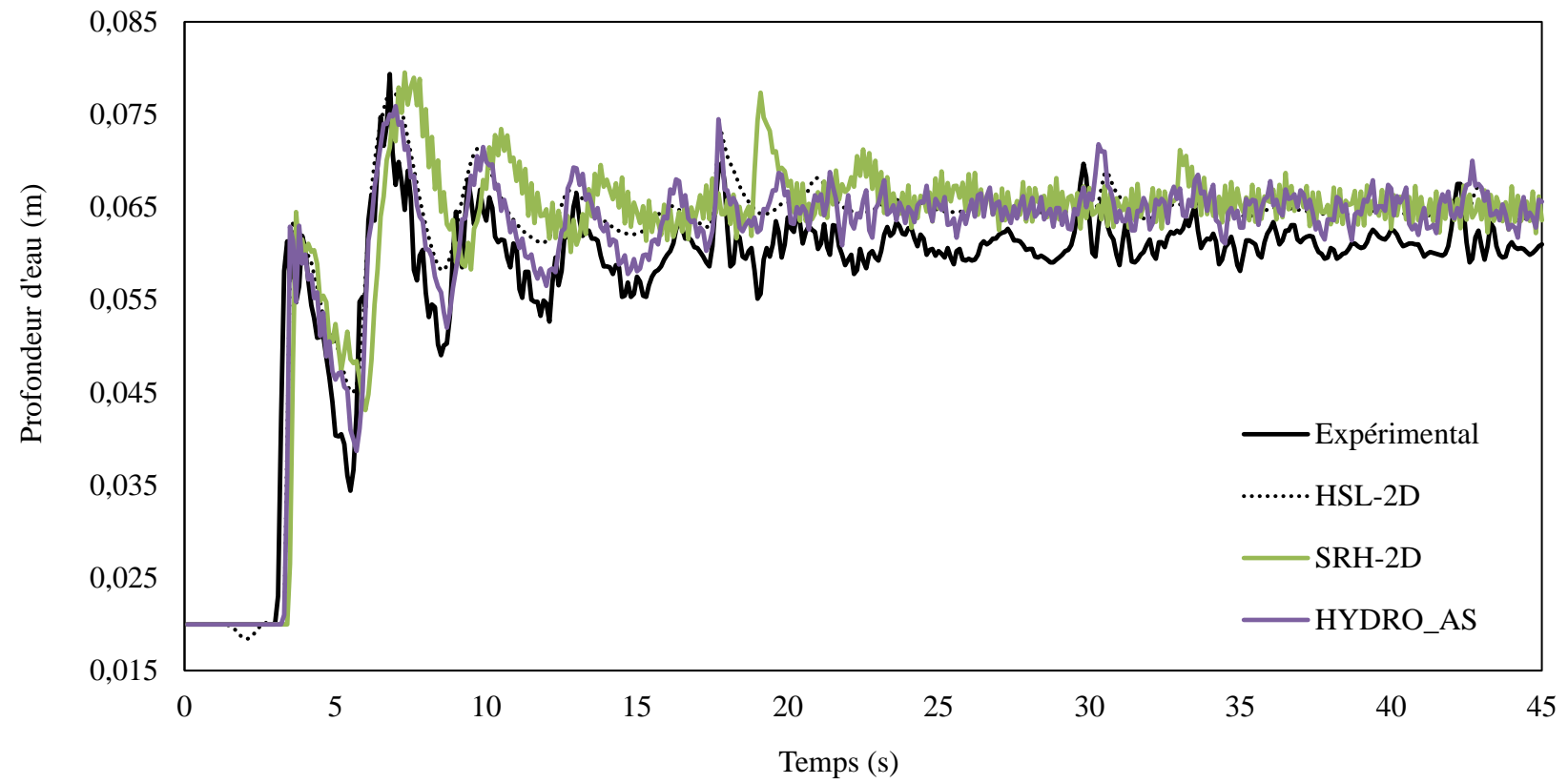


Figure D.2. Évolution de la profondeur d'eau à la jauge 1 – Maillage 2